

УДК 551.46
ББК 26.2
Т 80

Трухин В. И., Показеев К. В., Кунницын В. Е. **Общая и экологическая геофизика.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 576 с. — ISBN 5-9221-0541-8.

Учебник предназначен для изучения основ глобальной геофизики и экологии. Приведены сведения об основных фундаментальных понятиях твердой Земли, гидросферы и атмосферы, экологии. Даны описания глобального экологического кризиса, основных глобальных экологических проблем геофизики (глобальное потепление; загрязнение Мирового океана; озоновый кризис; геофизические явления, приводящие к стихийным бедствиям — цунами, ураганы, землетрясения и др.).

При подготовке издания использован материал лекций, прочитанных авторами на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова.

Для студентов, получающих фундаментальное естественнонаучное образование, в частности, по специальностям <Физика>, <Физика Земли и планет>, <Физическая экология>, <Медицинская физика>. Учебник будет также полезен для всех, интересующихся происхождением и эволюцией Земли, строением нашей планеты, ролью экологии в обеспечении ее устойчивого развития.

© ФИЗМАТЛИТ, 2005

© В. И. Трухин, К. В. Показеев,
В. Е. Кунницын, 2005

ISBN 5-9221-0541-8

Предисловие

Несмотря на огромные достижения в последние десятилетия в деле проникновения человека в Космос, Земля остается и, видимо, еще долго будет оставаться нашим единственным домом, единственной базой для всех мероприятий человечества. Именно Земля еще долго будет основным источником всех ресурсов, необходимых для жизнедеятельности и жизнеобеспечения, без которых невозможно само существование человечества, его культуры, его дальнейшее развитие. Именно по этой причине так резко повысилось внимание во всех странах к развитию всего комплекса наук о Земле и, едва ли не в первую очередь, геофизики. Во всех передовых странах ассигнования на развитие геофизики за последние годы существенно возросли.

Очевидно, что сохранение жизнеобеспечивающей экологической обстановки на нашей планете стало проблемой первостепенного значения, и в решении этой проблемы геофизика играет одну из ведущих ролей.

Следует подчеркнуть и еще одну важную особенность нашего времени. Мы живем в эпоху, когда острее, чем когда-либо, встал вопрос об обеспечении деятельности и жизни людей природными ресурсами. Необходимые природные ресурсы делятся на возобновляемые и практически невозобновляемые, накопленные на Земле за 4,5 млрд лет ее эволюции. Сейчас многие виды ресурсов близки к исчерпанию хотя бы в смысле их доступности. Уходят в прошлое те времена, когда многие виды ресурсов были относительно легко доступны и использовались без заметного ущерба для самой природы, для существования человечества. Большинство полезных ископаемых сосредоточено в недрах Земли, и естественным путем в первую очередь были израсходованы те из них, которые лежат вблизи земной поверхности. Сейчас мы вынуждены переходить к поискам полезных ископаемых на гораздо больших глубинах, а также на дне морей и океанов. Во всех этих случаях геофизические методы становятся ведущими.

Однако роль геофизики не ограничивается только поисками и разведкой полезных ископаемых. Фундаментальная геофизика

является почти единственным источником знаний о внутреннем строении нашей планеты и, в последние годы, таких ее космических соседей, как Луна, Марс, Венера, все другие планеты и само Солнце. Через изучение самых верхних частей атмосферы и различных физических полей Земли геофизика смыкается с изучением космического пространства.

Огромна роль геофизики в изучении процессов, протекающих в теле Земли начиная с глубин земного ядра и кончая водной и газовой оболочками Земли. Здесь мы подходим к изучению проблем развития, эволюции Земли во времени, эволюции ее внутреннего строения, самой проблемы происхождения различных оболочек Земли, их взаимодействия. Нет сомнений, что Земля в прошлом имела иное строение, ее современное строение явилось результатом эволюции во времени в результате процессов, протекавших и протекающих в теле планеты. Что эти процессы активно происходят и в наше время, что Земля — развивающееся тело, мы знаем благодаря проявлению этих процессов вблизи поверхности нашей планеты. Деятельность вулканов, землетрясения с очагами на глубине сотен километров, движение земной коры как в наше время, так и в глубоком геологическом прошлом все свидетельствует об активной жизни нашей планеты, о взаимодействии ее оболочек, об изменении их состава и функций и о постоянном изменении экологической обстановки.

Все эти изменения в прошлом происходили естественным путем, даже деятельность человека до последнего времени не влияла существенно на ход природных процессов: слишком малы были энергетические возможности человека по сравнению с энергетикой основных природных процессов, влияющих на развитие экологической обстановки на Земле в целом и в крупных ее регионах. Но с начала XX века и особенно в последние десятилетия положение стало меняться.

Чудовищное засорение среды обитания, безоглядное истребление всех природных ресурсов, перестройки крупных регионов земной поверхности в процессе хозяйственной деятельности с единственной целью получить максимальную сиюминутную выгоду — могут привести и уже приводят к последствиям, грозящим катастрофами.

Даже неизбежная хозяйственная деятельность, как и широкое использование ядерной энергии, без должного учета геофизического и других факторов грозит бедственными последствиями, примеры которых мы уже имели случаи наблюдать. Нечего и говорить о часто предлагаемых новых гигантских проектах,

сулящих огромные выгоды, но влекущих тяжелые последствия, быть может, замедленного действия, но тем более опасные.

Наконец, необходимо отметить огромную роль, которую играет геофизика в решении самых фундаментальных проблем естествознания — проблемы зарождения и развития нашей планеты и родственных ей планет, проблемы возникновения, развития и преобразования верхних оболочек Земли: каменной (кора), водной и газовой. Эти оболочки, их свойства, строение, состав, их взаимодействие целиком определяют всю область биосферы, область, где появилась и существует жизнь на Земле. Сейчас уже можно говорить, что органическая жизнь появилась на нашей планете практически одновременно с образованием земной коры, т. е. 3–3,5 млрд лет назад, и вряд ли можно сомневаться, что на ход эволюции биосферы существенное влияние оказывает характер эволюции всех трех оболочек Земли, изменения их состава, строения и взаимодействия.

Нет сомнения, что все эти явления определялись жизнью, развитием всей массы планеты, процессами на всех ее глубинах. Вспомним, что такое важнейшее поле, как магнитное поле планеты, в значительной степени определяется свойствами земного ядра и процессами в нем. Таким образом, мы неизбежно приходим к выводу, что недра планеты определяют ход и направление развития ее внешних оболочек. Без изучения глубоких частей земных недр нельзя вскрыть причины основных геотектонических и магматических процессов — процессов, определяющих лик нашей планеты и причины различий между ликом Земли и других планет земной группы. Здесь мы находимся еще в самом начале пути. Достаточно напомнить, что мы еще почти ничего не знаем о природе и причинах возникновения и исчезновения такого широко известного явления, как континентальные оледенения Земли, которые неоднократно возникали в течение геологической истории.

Само образование и размещение в земной коре большинства полезных ископаемых определяется теми же глубинными процессами, без знания которых будет невозможно планировать поиски необходимых ресурсов. То же относится и к проблемам сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

Дальнейшее развитие Земли и ее оболочек будет определять условия жизни на нашей планете. Однако влияние человека на природу становится столь существенным, что необходимо не только учитывать, но и ограничивать это влияние с целью сохранения нормальной экологической обстановки на Земле.

Введение

По современным представлениям ученых, занимающихся проблемами происхождения и эволюции Космоса, Вселенной, на ранних этапах эволюции Вселенной не было ни планет, ни звезд, ни галактик, ни их скоплений. Была только более или менее однородная водородно-гелиевая плазма. Эти представления базируются не только на теоретических расчетах, но и на наблюдениях и анализе так называемого «реликтового» радиоизлучения Вселенной, которое представляет собой «выродившееся» по причине красного смещения излучение горячей плазмы, сохранившееся с той эпохи, когда никаких звезд и галактик не было. По интенсивности реликтовое излучение соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре около 3 К.

Красным смещением называется явление смещения спектральных линий далеских галактик в длинноволновую часть спектра. Это явление интерпретируется как доплеровский сдвиг частоты излучения, возникающий при движении источника излучения от наблюдателя со скоростью, пропорциональной расстоянию. Отсюда возникла гипотеза о расширении Вселенной. Экстраполяция во времени назад приводит к выводу, что расширение Вселенной началось свыше 10 млрд лет назад. Начало расширения трактуется как Большой взрыв, сразу после которого и появилось то микроволновое излучение, которое теперь называется реликтовым. В эпоху, когда возникло наблюдаемое сейчас реликтовое излучение, тогдашняя Вселенная была умеренно нагретой (4000 К) плазмой, заключенной в небольшой области, радиус которой составлял около 15 млн световых лет. Это в несколько раз меньше современного расстояния от Солнечной системы до центра скоплений галактик в созвездии Девы, к которому принадлежит и наша Галактика. Современные расстояния до удаленнейших от нас галактик исчисляются многими миллиардами световых лет. Концентрация частиц в вышеупомянутой «первобытной» плазме была умеренной — около 3000 на 1 см³, и

все пространство было заполнено равновесным излучением, соответствующим температуре 4000 К, химический состав плазмы очень простой: смесь водорода и гелия. Более тяжелых элементов в ней почти не содержалось.

И вот из этой простейшей плазмы в процессе ее дальнейшей эволюции возникло все огромное многообразие наблюдаемой нами в настоящее время Вселенной. По-видимому, очень сложным способом, непонятным до сих пор, образовались тяжелые элементы, появились частицы сверхвысоких энергий, космические лучи, галактики, очень разнообразные по своим характеристикам звезды, планеты и на нашей планете — все многообразие природы и живых существ. Ученые предполагают, что возможно существование живых организмов и на некоторых других планетах, обращающихся вокруг других звезд.

О механизме грандиозного фантастического процесса эволюции Вселенной, приводящего к ее непрерывному усложнению, можно только строить те или иные предположения. Однако можно с уверенностью указать на один принципиальный фактор, с необходимостью вызывающий эволюцию вещества во Вселенной, — это так называемая «гравитационная неустойчивость», смысл которой был ясен еще Ньютону, а ее теория была создана в начале XX века известным английским астрономом Джинсом. Сущность неустойчивости состоит в том, что по причине всемирного тяготения материя не может быть распределена с постоянной плотностью в сколь угодно большом объеме. С неизбежностью в силу взаимного притяжения она должна «разбиться» на отдельные конденсации, сгустки. В первоначальной Вселенной почти однородная плазма должна была распасться сначала на огромные сгустки, из которых в дальнейшем образовались скопления галактик. Галактики по той же причине разбились на «протогалактики», из которых естественным образом возникли «протозвезды». Образование звезд из «диффузной» межзвездной среды, как установлено, продолжается и в настоящее время.

Возможно, что кроме гравитационной неустойчивости существуют и другие фундаментальные причины, приводящие к эволюции материи во Вселенной. Эта глубокая проблема требует дальнейшего всестороннего исследования.

Наша Галактика, в которой находится наша крошечная планета Земля, образует только малую часть Вселенной. Солнце и его планетная система расположены во внешней части Галактики, представляющей собой дискообразное скопление звезд и межзвездных пыли и газа, видимых нами как Млечный Путь. Среднее расстояние Земли от Солнца $149,6 \cdot 10^6$ км, а средняя

скорость ее движения по орбите 29,8 км/с. В табл. 1 приведены данные о Солнце и планетах Солнечной системы. Возраст Галактики, определенный на основе подсчета содержащихся в метеоритах радиоактивных протонов урана и тория и продуктов их распада, оценивается в 10 млрд лет. Солнечная система сформировалась приблизительно на 5 млрд лет позже образования Галактики.

Существует два основных класса звезд: звезды главной последовательности и гиганты (определяются по диаграмме Герцшпрунга Рассела). Солнце является довольно типичной звездой главной последовательности, оно прошло стадию сжатия из межзвездного вещества свыше 4,5 млрд лет назад.

По современным представлениям планеты и их спутники образовались одновременно с Солнцем при конденсации газопылевого Солнечного облака. Это так называемая небулярная гипотеза, высказанная еще Декартом и Кантом и вновь привлекавшая внимание ученых во второй половине XX столетия. Соперничающая с ней группа гипотез связывает образование планет с катастрофическим явлением, например с приближением к Солнцу другой звезды, «вытянувшей» из Солнца газовую струю, впоследствии сконденсировавшуюся в планеты, со взрывом сверхновой и т.п. Катастрофические гипотезы встречаются намного больше трудностей, чем небулярная гипотеза, при объяснении последовательности процессов формирования планет, поэтому общепринятой в настоящее время является небулярная. Она хорошо согласуется с современными взглядами на образование звезд и объясняет многие закономерности строения Солнечной системы. Наиболее труднообъяснимыми остаются такие факторы, как, во-первых, несоответствие между распределением массы вещества в Солнечной системе (более 99% принадлежит Солнцу) и момента количества движения (98% принадлежит планетам), во-вторых, химическое несоответствие между планетами-гигантами и планетами земной группы и, в-третьих, неполная ясность механизма конденсации.

В настоящее время в рамках небулярной гипотезы первое несоответствие объясняется взаимодействием между магнитным полем Солнца и ионизированным газопылевым облаком, которое может привести к передаче момента во внешние части сжимающегося облака. К такому же результату могут привести и эффекты турбулентности в облаке.

Таблица 1. Физические характеристики Солнца и планет

Небесное тело	Среднее расстояние от Солнца, млрд км	Масса, кг	Период вращения вокруг оси	Средний радиус, км	Средняя плотность, кг/м ³	Наклон экватора к орбите	Сжатие
Солнце		$1,99 \cdot 10^{30}$	26 земных суток	$696 \cdot 10^3$	1,41; в центре 98,0	71°5'	
Меркурий	57,91	$3,304 \cdot 10^{23}$	58,6 земных суток	243,7	5,45	0°	0,00
Венера	108,21	$4,872 \cdot 10^{24}$	243,16 земных суток; обратное вращение	6050	5,25	86°	$1 : 3 \cdot 10^4$
Земля	149,60	$5,978 \cdot 10^{24}$	23 ч 56 мин 04 с	6371	5,518	23°27'	1 : 298,25
Марс	227,94	$6,423 \cdot 10^{23}$	24 ч 37 мин 23 с	3388	3,943	24°48'	1 : 191,1
Юпитер	778,30	$1,900 \cdot 10^{27}$	9 ч 50 мин	69720	1,34	3°7'	1 : 15,3
Сатурн	1429,3	$5,689 \cdot 10^{26}$	10 ч 14 мин	57900	0,70	26°45'	1 : 10,2
Уран	2875,03	$8,72 \cdot 10^{25}$	10 ч 42 мин; обратное вращение	24540	1,41	98°0'	1 : 18
Нептун	4504,4	$1,03 \cdot 10^{26}$	15 ч 48 мин	25000	1,58	29°	1 : 60
Плутон	5900	$10^{23} - 10^{24}$	6,39 земных суток	2200	?	?	?

На важность химических данных в теории происхождения Солнечной системы впервые указал Юри. Различные тела Солнечной системы образованы в основном тремя группами химических элементов. Около 90% массы Солнца составляют водород и гелий (I группа), около 1,5% — углерод, азот и кислород (II группа) и около 0,25% — магний, железо и кремний (III группа). Планеты земной группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и астероиды обладают значительной плотностью и состоят преимущественно из Mg, Fe и Si. Юпитер и Сатурн крупнее земных планет, их состав (в основном H и He), возможно, мало отличается от состава Солнца или первичной околосолнечной туманности. Состав Урана и Нептуна определяется твердыми соединениями элементов II группы: метаном, аммиаком и льдом. Таким образом, во время формирования планет должна была происходить сильная химическая дифференциация. Менее летучие элементы III группы должны были выделиться из облака в окрестностях планет земной группы, когда облако вытягивалось под действием магнитных или иных сил. Тогда же водород и гелий, составлявшие свыше 90% всей первоначальной массы облака, интенсивно улетучивались в окружающее пространство в окрестностях Юпитера и Сатурна. Однако механизм этого «выдувания» неясен.

Можно нижеследующим образом подытожить возможные стадии формирования Солнечной системы.

За счет сил гравитации Солнце сжималось, и поэтому его угловая скорость постепенно увеличивалась. При этом вращающийся газопылевой диск вытягивался в экваториальной плоскости. Как впервые предположил Лаплас, околосолнечное облако образовалось после того, как вещество было выброшено с солнечного экватора, когда центробежная сила превысила силы тяготения.

В результате передачи момента количества движения от Солнца к облаку (возможно, за счет взаимодействия магнитного поля Солнца (1 Гс) с ионизированной частью облака) вращение Солнца замедлялось, облако расширилось до размеров всей Солнечной системы.

С перераспределением от Солнца к облаку момента количества движения связана общая потеря энергии вращения, что могло произойти вследствие излучения облаком частиц высокой энергии при внезапных возмущениях магнитного поля. При этом могли образоваться легкие элементы, например литий, и некоторые короткоживущие радиоактивные изотопы, например Al^{26} .

При интенсивном истечении первичных H и He в окружающее пространство началась химическая дифференциация: на месте

будущих внешних планет концентрировались Н и Не, на месте планет земной группы — кремний, железо, магний.

По мере охлаждения околосолнечное облако конденсировалось в пылинки и более крупные частицы, двигавшиеся по эллиптическим орбитам вокруг Солнца в поле его тяготения.

Частицы с близкими орбитами сталкивались и слипались, вырастая до размеров крупных тел. Когда тела достигли размеров 1 км и более, процесс столкновения и слипания усилился за счет тяготения. В конечном итоге образовались планеты, их спутники и астероиды. Большая часть газа и пыли, составлявших первичное облако, заключена в этих телах или же рассеялась в пространстве.

В процессе аккреции момент количества движения продолжал передаваться пока неизвестным способом от облака к новообразованным планетам и спутникам.

На начальных стадиях аккреции малые тела, возможно, сильно разогревались из-за распада радиоактивных изотопов, в частности Al^{26} . Эти изотопы могли появиться в результате облучения облака частицами высокой энергии. Разогрев мог вызвать разделение железоникелевой и силикатной фаз и другие тепловые процессы в образовавшихся телах. Метеориты возникли в результате разрушения некоторых тел.

Процесс образования Солнечной системы в основном закончился около 4,5 млрд лет назад, и с тех пор общая структура системы не претерпела существенных изменений. За это время могли произойти захваты планетами спутников, а скорость вращения планет, особенно Меркурия, Венеры и Земли, могла замедлиться под воздействием приливного трения.

К настоящему времени в Солнечной системе обнаружено 9 планет, 32 спутника, более 150 тыс. астероидов, около 100 комет. Все планеты движутся вокруг Солнца в направлении вращения Солнца, их слабоэллиптические орбиты находятся почти в одной плоскости — плоскости эклиптики. Большинство спутников планет также обращается в плоскости эклиптики. В том же направлении происходит вращение планет, кроме Венеры и Урана.

Планеты делятся на две группы: внутренние (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и внешние (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун, Плутон). Для внутренних планет характерны повышенная концентрация углерода, азота и кислорода и недостаток водорода и гелия. Они имеют высокие плотности за счет содержания тяжелых оксидов и наличия железистого ядра.

Внешние планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн) состоят из смеси водорода и гелия. Уран, Нептун и Плутон — из водорода

в соединении с углеродом, азотом и кислородом. Между внутренними и внешними планетами расположен пояс каменных астероидов (малых планет), число которых превосходит 3 тыс. Самая большая из малых планет — Церера, 770 км в диаметре, масса около $1/8000$ массы Земли. Самые малые планеты имеют диаметр около 1 км.

Ближе, чем Меркурий, подходит к Солнцу Икар, к Сатурну ближе всего подходит Гидальго.

Глава 1

Фигура Земли

Геонд

Мысль о том, что Земля имеет форму шара, была высказана Пифагором еще в 530 г. до н. э. Эратосфен в 200 г. до н. э. сделал первую попытку определить размеры земного шара. Измерив на поверхности некоторую дугу большого круга b и соответствующий ей центральный угол φ , Эратосфен определил радиус Земли R из соотношения

$$R = \frac{b}{\varphi}.$$

Только в конце XVII столетия форма и размеры Земли стали рассматриваться не только как геометрическая, но и как физическая проблема. Ньютон в «Математических началах натуральной философии» изложил теорию фигуры Земли на основе закона всемирного тяготения. Он был первым, кто показал, что из-за вращения Земля должна быть не сферой, а эллипсоидом вращения, полярный радиус $R_{\text{п}}$ которого меньше экваториального $R_{\text{э}}$, т. е. Земля сплюснута по оси вращения. Ньютон впервые вычислил сжатие Земли по формуле

$$\alpha = \frac{R_{\text{э}} - R_{\text{п}}}{R_{\text{э}}}. \quad (1.1)$$

Рассмотрим однородную пластичную модель Земли, которая не вращается вокруг оси. В этом случае сила тяжести, действующая на единицу массы на поверхности, была бы направлена к центру. Обозначим эту силу вектором $\mathbf{MA}$. Земля в этом случае имела бы форму шара с радиусом $R = OM$ (рис. 1.1). В результате вращения появляется центробежная сила $f_{\text{ц}} = \omega^2 R \cos \varphi_1$. Под влиянием двух сил $\mathbf{MA}$ и $f_{\text{ц}}$ однородный пластичный шар должен принять такую форму, которая в каждой точке нормальна к результирующей силе $\mathbf{MA}_1$, являющейся векторной суммой сил $\mathbf{MA}$ и $f_{\text{ц}}$. Такой формой будет эллипсоид вращения. В случае эллипсоида нормально к поверхности будет направление $\mathbf{MA}_1$ (рис. 1.2). Каждую из двух сил $\mathbf{MA}$ и $f_{\text{ц}}$ можно разложить на составляющие, ориентированные по $\mathbf{MA}_1$ и по

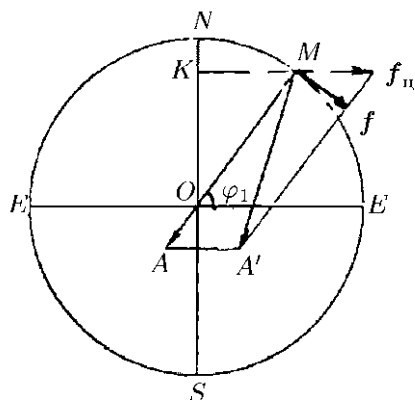


Рис. 1.1. Сила тяжести MA , центробежная сила f_n , горизонтальная составляющая центробежной силы f

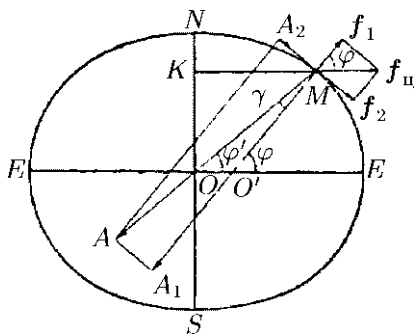


Рис. 1.2. MA — сила тяготения; MA_1 и MA_2 — ее вертикальная и горизонтальная составляющие; f_n , f_1 , f_2 — центробежная сила и ее вертикальная и горизонтальная составляющие

перпендикулярному к MA_1 направлениям. Для того чтобы единичная масса в точке M была в равновесии, необходимо, чтобы составляющая силы тяготения MA_2 была равна составляющей центробежной силы f_2 , или

$$MA \sin \gamma = \omega^2 R \cos \varphi' \sin \varphi.$$

Если это равенство не выполнено, то возникнет сила, стремящаяся сместить единичную массу к экватору или к полюсу. В направлении по нормали на единичную массу будет действовать сила

$$MA_1 - f_1 = MA \cos \gamma - \omega^2 R \cos \varphi' \cos \varphi,$$

которая и определяет ускорение свободного падения g . При условии, что $\varphi' = \varphi$, получаем для единичной массы в точке M :

$$g = MA \cos \gamma - \omega^2 R \cos^2 \varphi. \quad (1.2)$$

В связи с тем что перпендикулярная к MA_1 составляющая центробежной силы в случае сплюсненной Земли уравнивается составляющей силы тяготения, мы, находясь на поверхности вращающейся Земли, не ощущаем ее вращения.

В случае изначально круглой Земли на единичную массу в точке M действовала бы сила f (рис. 1.1). Под действием этой силы частицы некоторого приповерхностного слоя могли перемещаться от полюсов к экватору, что и привело к сплюсчиванию Земли и к компенсации силы f .

Все сказанное справедливо для модели однородной Земли. На самом деле плотность Земли возрастает к центру и задача усложняется. Решение для слоев с различной плотностью получено Клеро в 1743 г.

В действительности вопрос еще более сложен. Если для значительной толщи Земли можно установить некоторый закон изменения плотности, то для верхней части земной коры это сделать невозможно. Поэтому поверхность Земли нельзя точно описать ни одной из известных аналитических поверхностей. Фигура Земли наиболее близка к сфероиду, который с точностью до членов порядка сплюснутости совпадает с эллипсоидом вращения. Точнейшие геодезические измерения, спутниковые данные и данные гравиметрии приводят к более точному представлению о фигуре Земли, к понятию о так называемом геоиде (по гречески — землеподобный). Геоид не является правильной геометрической фигурой, за поверхность геоида принимается некоторая поверхность, в каждой точке перпендикулярная линии отвеса (уровневая поверхность). Эта поверхность совпадает со спокойной поверхностью воды в океанах и в мысленно прорезывающих все континенты бесконечно узких каналах, соединяющих океаны. От поверхности геоида отсчитывают высоты и впадины различных точек на Земле (от уровня моря). Расхождение между поверхностями геоида и эллипсоида (референц-эллипсоид, сфероид) не превосходит несколько десятков метров, в то время как разность R_3 и $R_{\text{п}}$ составляет 21,385 км. По современным измерениям $R_3 = 6378,142$ км, $R_{\text{п}} = 6356,757$ км; сжатие геоида $\alpha = (R_3 - R_{\text{п}})/R_3 = 1/298,255$, что составляет 0,3%, у Юпитера — 6%. Спутниковые измерения показали, что Южный полюс на 30 км ближе к центру Земли, чем Северный. Средний радиус Земли находится из соотношения

$$\frac{4}{3}\pi R_{\text{ср}}^3 = \frac{4}{3}\pi R_3^2 R_{\text{п}},$$

т. е. эллипсоид приравняется к равносильному шару. Получаем

$$R_{\text{ср}} = 6371,032 \text{ км.} \quad (1.3)$$

Из этих данных можно определить площадь поверхности Земли: $510\,069\,000 \text{ км}^2$, из них 29,2% суша и 70,8% водная поверхность. Объем Земли — $1,1 \cdot 10^{27} \text{ см}^3$, масса — $6 \cdot 10^{27} \text{ г}$, что составляет $3 \cdot 10^{-6}$ массы Солнца. Средняя плотность Земли — $5,5 \text{ г/см}^3$.

Как следует из уравнения (1.2), сила тяжести является результирующей сил притяжения и центробежной силы и зависит

от широты места. Введем в рассмотрение потенциал силы тяжести W , который складается из потенциалов притяжения V и центробежных сил U .

Потенциал является скалярной функцией, производные которой по осям координат равны проекциям сил тяжести. Физическая сущность потенциала заключается в том, что приращение потенциала есть работа силы по перемещению единичной точечной массы. В любой точке поверхности равного потенциала сила направлена по нормали к ней. Работа силы при перемещении по этой поверхности равна нулю ($dW = 0$). Такая поверхность называется эквипотенциальной или уровнем.

Выражение для потенциала V получается из закона всемирного тяготения Ньютона. Притяжение единицы массы элементом массы dm на расстоянии r , согласно этому закону, равно

$$F' = G \frac{dm}{r^2}, \quad (1.4)$$

где $G = 6,666 \cdot 10^{-8} \text{ г}^{-1}\text{см}^3\text{с}^{-2}$ — постоянная тяготения. Тогда потенциал притяжения Земли в точке вне ее будет равен

$$V = G \int \frac{dm}{r}. \quad (1.5)$$

Если бы Земля была точной сферой со сферически-симметричным распределением плотности, то

$$V = \frac{GM}{r}, \quad (1.6)$$

где M — масса, R — радиус сферической Земли. Реальная Земля на 1/300 отклоняется от сферы, поэтому к основной части потенциала (1.6) необходимо добавить поправочные члены. С учетом первого поправочного члена выражение для V будет иметь вид

$$V = \frac{GM}{r} \left[1 - \left(\frac{R_3}{r} \right)^2 I_2 P_2(\cos \Theta) \right], \quad (1.7)$$

где r — расстояние от центра Земли, R_3 — экваториальный радиус,

$$P_2(\cos \Theta) = \frac{2}{3} \cos^2 \Theta - \frac{1}{2} \quad (1.8)$$

— второй полином Лежандра, $\Theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$,

$$I_2 = \frac{C - A}{MR_3^2}, \quad (1.9)$$

A и C — моменты инерции относительно R_3 и R_{Π} соответственно. Значение $I_2 = 1082,65 \cdot 10^{-6}$, т.е. порядка величины сжатия Земли (1/300).

Для проблемы внутреннего строения Земли большое значение имеет величина среднего момента инерции

$$I = \frac{C + 2A}{3}, \quad (1.10)$$

которая с учетом величин средней плотности $\rho_0 = \frac{3M}{4\pi R_3^2 R_{\Pi}}$ и данных сейсмологии позволяет получить распределение плотности в недрах Земли.

В случае постоянной плотности планеты ее безразмерный момент инерции равен

$$I^* = \frac{I}{MR^2} = 0,4. \quad (1.11)$$

Если с глубиной плотность увеличивается, то $I^* < 0,4$, если уменьшается, то $I^* > 0,4$. Значение I^* для Земли равно 0,3315, что указывает на существенное увеличение плотности в недрах Земли.

Потенциал центробежных сил равен

$$U = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \cos^2 \varphi. \quad (1.12)$$

Полный потенциал силы тяжести W равен сумме:

$$W = V + U. \quad (1.13)$$

Учитывая (1.7), (1.12) и заменяя Θ в выражении (1.8) на $\frac{\pi}{2} - \varphi$, получаем

$$W = \frac{GM}{r} - \frac{GM R_3^2}{r^3} I_2 \left(\frac{2}{3} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \varphi. \quad (1.14)$$

W является потенциалом сфероида.

Ускорение силы тяжести находится так:

$$\mathbf{g} = -\text{grad } W; \quad (1.15)$$

азимутальная и радиальная составляющие ускорения вычисляются как соответствующие производные:

$$\left(g_{\varphi} = \frac{\partial W}{r \partial \varphi}, \quad g_r = -\frac{\partial W}{\partial r} \right).$$

Полная величина g равна

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial W}{r \partial \varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)^2}. \quad (1.16)$$

На основании уравнений (1.14) и (1.16) можно установить связь между g и сжатием Земли α :

$$g = g_3 \left[1 + \left(\frac{5\omega^2 R_3^3}{2GM} - \alpha \right) \sin^2 \varphi \right], \quad (1.17)$$

где

$$g_3 = \frac{GM}{R_3^2} \left(1 + \frac{3}{2} I_2 \frac{\omega^2 R_3^3}{GM} \right). \quad (1.18)$$

Уравнение (1.17) впервые было получено Клеро в 1743 г., его можно записать более просто:

$$g = g_3 (1 + \beta \sin^2 \varphi), \quad (1.19)$$

где $\beta = \frac{5}{2}q - \alpha$, $q = \frac{\omega^2 R_3}{g_3}$ — отношение центробежной силы к силе тяжести на экваторе.

Таким образом, сила тяжести в любой точке земного шара обусловлена:

- 1) действием всего земного сфероида и центробежной силой в случае равномерного наслонения вещества;
- 2) влиянием рельефа местности в точке наблюдения;
- 3) неравномерным распределением масс в земной коре.

Аномалия силы тяжести. Изостазия

Расчеты фигуры Земли, начиная с Ньютона, производились при условии, что Земля находится в состоянии гидростатического равновесия, что достаточно близко характеризует реальное состояние Земли. Отклонение поверхности геоида от поверхности сфероида как раз связано с некоторым отклонением реального состояния Земли от гидростатического равновесия. Спутниковые данные показали, что это отклонение имеет величину порядка квадрата сжатия (α^2). Отклонение фигуры Земли от равновесной составляет $\alpha^2 R \approx 70$ м.

В связи с тем гравитационное поле (и соответственно геопотенциал) состоит из слагаемых, существенно различающихся по величине, оно разделяется на нормальное поле с потенциалом W_0

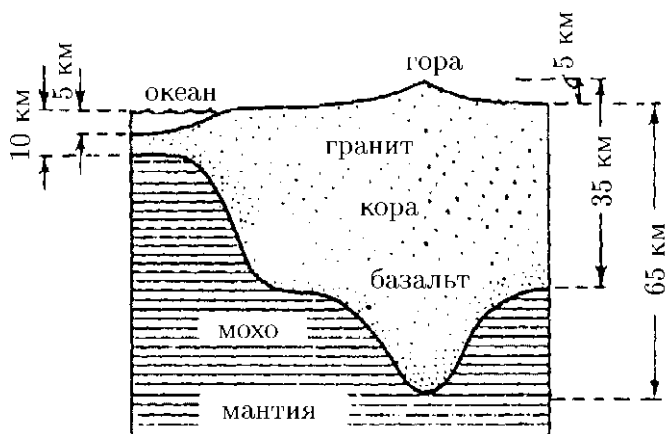


Рис. 1.3. Изостатическое равновесие между корой и мантией

и возмущенное (аномальное) с добавочным потенциалом T . Потенциал сфероид (1.14) определяет нормальное поле сил тяжести и, соответственно, нормальную фигуру Земли. Отклонения геоида от сфероид не превышают 70 м, с помощью спутниковых данных построены карты высот геоида (отклонений от сфероид).

Высоты геоида пропорциональны амплитудам гравитационных аномалий. Интересно то, что аномалии не связаны с топографическими особенностями поверхности (горы, впадины и т.п.), кстати последние и не описываются поверхностью геоида. Из этого следует важнейший вывод: континентальные области изостатически скомпенсированы, т.е. материки как бы плавают в подкоровом субстрате, словно гигантские айсберги в полярных морях. Аномалии силы тяжести вызваны различными флуктуациями плотности в коре и мантии Земли.

Идея изостазии, высказанная в середине XIX века, объяснила тот удивительный факт, что наличие гор почти не сказывается на гравиметрических измерениях. Согласно принципу изостазии, легкая земная кора, состоящая из гранита и базальта, изостатически уравновешена на более тяжелой мантии, как показано на рис. 1.3.

Получается так, что масса вещества на единицу площади, измеренная вплоть до некоторой глубины в коре или мантии, приблизительно одинакова для всей поверхности Земли.

Земные приливы

Из-за сплюснутости Земли возникает прецессия земной оси. Находясь вблизи эклиптики, Луна и Солнце не всегда лежат в плоскости симметрии экваториального вздутия Земли. Часть этого вздутия, которая в данное время расположена ближе к Луне или Солнцу, притягивается ими сильнее, чем противоположная часть. Это создаст моменты сил, стремящиеся повернуть ось Земли в перпендикулярном к оси направлении. В результате ось Земли будет описывать в пространстве два конуса с одной вершиной в центре Земли. Поэтому направление от центра Земли к северному полюсу удаляется от направления на полюс мира, достигает наибольшего отклонения в 47° и приходит к прежнему значению через 25750 лет. Средняя скорость прецессии составляет около $50,25''$ в год.

Независимо от гравитационного взаимодействия с другими телами Земля испытывает собственные колебания, которые возникают из-за того, что ось вращения Земли немного наклонена к оси наибольшего момента инерции. Эти колебания называют свободной нутацией, или чандлеровскими колебаниями (по имени их открывателя).

Чандлеровские колебания полюса выражаются в вариациях широты с периодом в 430–435 суток и средней амплитудой около $0,14''$.

Глава 2

Землетрясения и сейсмология

Катастрофические землетрясения

Ежегодно на Земле сейсмографы фиксируют более 100 тысяч землетрясений. Из них людьми ощущаются около 10 тысяч и разрушительными бывают около 100 землетрясений. Эти подземные бури наносят большой ущерб жизнедеятельности и приводят к огромным человеческим жертвам. В то же время геофизикам они дают возможность достаточно детально изучать внутреннее строение Земли. При этом одной из важнейших целей геофизических исследований является предсказание времени и места предстоящих землетрясений. В случае решения этой сложнейшей проблемы появилась бы возможность своевременного предупреждения населения о предстоящем землетрясении, что позволило бы уменьшить до минимума или исключить вовсе гибель людей.

Обратим внимание на наиболее крупные, катастрофические землетрясения, происшедшие во II тысячелетии.

Извержению вулкана Везувий в Италии 24 августа 79 г. предшествовала серия продолжительных землетрясений, в результате которых разрушались храмы, гибли люди. Во время извержения вулкана полностью погибли города Помпея и Геркуланум. Одним из самых разрушительных землетрясений за всю историю человечества является землетрясение на Среднем Востоке, происшедшее в 1201–1202 гг. Оно ощущалось на площади 2 млн км², включая Египет, Сирию, Малую Азию, Сицилию, Армению, Азербайджан. По данным историков погибло более 1 млн человек.

В русских летописях упоминается о сильном землетрясении 1230 года, которое захватило Киев, Переяславль, Владимир, Новгород. В Киево-Печерской лавре церковь Пресвятой Богородицы распалась на четыре части, рухнула трапезная. В Переяславле церковь св. Михаила распалась на две части. О человеческих жертвах не сообщается.

В Китае катастрофическое землетрясение с магнитудой $M = 8,0$ произошло в 1556 г. в провинции Сиань, расположенной

на берегу реки Хуанхэ, где равнины наполнены рыхлыми осадками. По данным историков целые города погружались в грунт, разжиженный вследствие сейсмических колебаний. Землетрясение произошло в 5 часов утра, и число жертв было огромно — около 830 тыс. человек.

В Китае 28 июля 1976 г. под городом Таншан произошло одно из самых крупных землетрясений XX столетия. Землетрясение имело магнитуду 8,2, его разрушительная энергия была ужасной. Жилые дома, промышленные строения превратились в груду обломков. Были обрушены мосты, искривлены железнодорожные рельсы, перевернуты поезда, повреждены автостреды, разорваны трубопроводы, разрушены плотины. В полуторамиллионном городе погибла почти половина населения.

Сильнейшее землетрясение произошло 1 ноября 1755 г. в Лиссабоне — столице Португалии. По современным оценкам сейсмологов его магнитуда была около 8,6, т.е. на максимальном энергетическом пределе. В 9 часов утра раздался звук, похожий на подземный гром. Это был первый из трех главных толчков, который продолжался 6 мин. Оставшиеся в живых пытались покинуть рушащийся город. Через час после первого толчка море отступило, обнажив приливную полосу и нахлынуло на берег в виде нескольких волн цунами высотой от 5 до 7 м. Волны накрыли набережную и людей, после отступления волн от массивной каменистой набережной не осталось и следа. Город Лиссабон превратился в груды развалин, погибло около 50 тыс. человек.

19 апреля 1906 г. в Калифорнии произошло одно из крупнейших землетрясений с магнитудой 8,3. В результате землетрясения на поверхности Земли образовался глубокий разлом шириной около 6 м и длиной 450 км (разлом Сан-Андреас). Во время землетрясения произошло три толчка, которые продолжались чуть более 1 мин. Были разрушены многие районы Сан-Франциско. Из-за разрывов газопроводов возникли пожары — сгорели все деревянные постройки, из которых, в основном, состоял город. Число погибших — около 700 человек.

В Турции во время землетрясения в 1939 г. ($M = 7,9$) в г. Эрзинджан погибло 40 тыс. человек. С тех пор в Турции произошло более 20 катастрофических землетрясений, унесших 20 тыс. человеческих жизней. Самым разрушительным было землетрясение, произошедшее 17 августа 1999 г. ($M = 7,7$). Его жертвами стали 14 тыс. человек.

В Чили 22 мая 1960 г. произошло катастрофическое землетрясение, оно разрушило город Консепсьон, а также крупные промышленные центры: Пуэрто-Монт, Валдивия, Осорно. Без

жилья остались миллионы чилийцев. Возникшее после землетрясения цунами смыло порт Анкупд и обрушилось практически на все Тихоокеанское побережье, достигло берегов Японии, где от цунами погибло 120 человек.

В Иране, где происходит много землетрясений, в 1972 г. произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 7,1. Был полностью разрушен город Кир, погибло 5400 человек. Еще более сильное землетрясение ($M = 7,7$) произошло в г. Тесбессе в 1978 г. В городе и окрестностях погибло 15 тыс. человек.

На Аляске 26 марта 1964 г. произошло одно из самых мощных землетрясений ($M = 8,5$). Продолжительность главного толчка составила 4 мин. Разрушения охватили площадь более 65 тыс. км². Погибло 130 человек. В результате образовавшегося цунами погибло еще 11 человек.

В Ташкенте 25 апреля 1966 г. произошло землетрясение средней энергии, 5,3 балла по шкале Рихтера. Город был почти полностью разрушен, так как не были соблюдены правила антисейсмического строительства.

В Армении 7 декабря 1988 г. произошло сильное землетрясение, около 7 баллов по Рихтеру. В зону землетрясения попали десятки городов Армении, Азербайджана и Грузии. Полностью был разрушен город Спитак, огромные разрушения были в Ленинкане, Кировкане. Погибло 25 тыс. человек, без жилья остались более 500 тысяч.

В Перу 1 мая 1970 г. произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,8. Разрушения наблюдались на площади 100 тыс. км². Наиболее катастрофические последствия были в густонаселенной долине Уайлас. Менее чем за 30 секунд в городе Уарасе обрушилась большая часть зданий, погибла половина его населения — 10 тыс. человек. В г. Юнгай в результате схода снежных лавин погибло 15 тыс. человек.

В Мексике 19 сентября 1985 г. произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой 8,2. Наиболее сильно пострадала столица Мехико — город с 17-миллионным населением. Целые жилые кварталы превратились в груду развалин, как карточные домики падали небоскребы, рухнула 100-метровая телебашня. Тысячи людей оказались заживо погребенными под развалинами домов, школ, церквей.

Новый сильный толчок последовал 20 сентября ($M = 7,3$), 30 сентября произошло третье землетрясение. В период с 19 по 30 сентября сеймостанции зарегистрировали свыше 70 толчков интенсивностью от 4,5 до 7,8 по шкале Рихтера.

21 октября в Мехико вновь ощущались подземные толчки, а 29 октября произошло новое землетрясение интенсивностью 5,7 баллов по Рихтеру. Всего погибло 7,5 тыс. человек, 350 тысяч мексиканцев лишились крова.

В районе Японских островов активность земных недр настолько высока, что в среднем в год здесь случается 1500 ощутимых подземных толчков. Самые сильные из них в основном возникают в двух гигантских разломах земной коры — Суруга и Сагами, располагающихся в открытом океане вдоль японского побережья. Именно здесь находился эпицентр крупнейших сейсмических бедствий в 1498, 1605, 1707, 1854, 1923, 1944 гг.

Самое сильное японское землетрясение произошло 1 сентября 1923 г. Оно имело интенсивность $M = 8,3$. Землетрясение охватило область провинции Южный Конто (включая Токио и Иокогаму) — экономические, политические и культурные центры Японии. Эпицентр землетрясения, получившего название «Великого землетрясения в Конто», находился примерно в 80 км к юго-западу от Токио, возле острова Осима в заливе Сугами.

Мощнейший подземный удар буквально за несколько секунд полностью и частично разрушил более 254 тыс. домов. Остальное довершили вспыхнувшие пожары: легкие домики из дерева, фанеры и бумаги были уничтожены огнем в течение считанных часов. Водопроводы были повреждены и бездействовали, пламя бушевало беспрепятственно. Более половины Токио и практически вся Иокогама были сожжены дотла. Число жертв было ужасающим: 40 тыс. человек собрались в городском парке, спасаясь бегством из горячих жилищ, и лишь 2 тысячи из них остались в живых, остальные задохнулись в дыму.

Многие маленькие города по берегу залива были уничтожены гигантскими волнами цунами, высота которых в ряде мест превышала 10–12 м. Жестокая подземная буря, разрушив Токио и Иокогаму, оставила без крова 3,5 млн человек и унесла 143 тыс. человеческих жизней. Ежегодно 1 сентября в день «Великого землетрясения в Конто» по всей Японии, особенно в Токио, проводятся учения с целью научить население правильному поведению во время буйства стихии.

Сильнейшие землетрясения происходили не только в историческое время, они с определенной, но далеко не всегда понятной, закономерностью взрывали и продолжают взрывать в разных географических регионах земную кору и верхнюю часть литосферы нашей планеты. Существует точка зрения, что пока это происходит, на Земле будут поддерживаться условия, необходимые для существования жизни. В заключение приведем краткие

сведения о трех очень сильных землетрясениях, последовавших одно за другим с сентября по декабрь 2003 г.

25 сентября произошло сильнейшее землетрясение с магнитудой 8,3 на острове Хоккайдо (Япония). Глубина очага — 27 км. Были человеческие жертвы (589 человек), разрушения дорог, дамб, произошли оползни, обвалы. Образовавшееся цунами с высотой волн от 4 м прокатилось вдоль юго-восточного побережья Хоккайдо. Последнее такое же ужасное землетрясение в этом регионе произошло 4 марта 1952 г. с магнитудой 8,1.

27 сентября 2003 г. сильнейшее землетрясение с магнитудой 7,3 произошло в России на Алтае, недалеко от границы с Монголией. Глубина очага — 16 км. Были человеческие жертвы, большие разрушения. Землетрясение ощущалось в Прокопьевске, Новосибирске, Абакане, Барнауле, Кемерово, Красноярске и других городах Восточной Сибири. Последнее крупное землетрясение в этом регионе произошло 20 декабря 1761 г. с магнитудой 7,7.

26 декабря 2003 г. землетрясение с магнитудой 6,6 произошло в юго-восточном Иране. Глубина очага — 10 км. Огромное количество людей погибло (16 200 человек), разрушено около 85 % зданий и другой инфраструктуры в окрестностях города Бам. Максимум интенсивности землетрясения наблюдался в городах Баме (9 баллов по шкале Рихтера) и Баравате (8 баллов). Последнее катастрофическое землетрясение наблюдалось в этом регионе более 2 000 лет назад.

Все три землетрясения вызвали очень крупные разрывы в земной коре, протяженность которых достигала нескольких километров.

Классическая сейсмологическая модель Земли

При землетрясениях возникают и распространяются по всему объему твердой Земли низкочастотные упругие волны, называемые сейсмическими волнами. Геофизическая наука, изучающая сейсмические волны, их источники — очаги землетрясений и строение твердой Земли или ее отдельных оболочек, называется сейсмологией. Она возникла в начале XX столетия. Одним из основателей сейсмологии был русский физик и геофизик, академик Императорской Санкт-Петербургской академии наук князь Борис Борисович Голицын (1862–1916).

Поскольку вещество с различными плотностью и другими механическими характеристиками распределяется в Земле неравномерно, твердая Земля имеет слоистое строение. Сейсмические методы дают наиболее точную и достоверную информацию о

внутреннем строении Земли. Вскоре после начала инструментальных наблюдений были обнаружены три основных структурных элемента внутри Земли: ядро, мантия (оболочка) и кора. Скорости распространения сейсмических волн зависят от плотности и модулей упругости горных пород. Упругие (или сейсмические) волны, возникая в толще Земли как объемные, порождают поверхностные волны, выходя на поверхность Земли или пересекая границы раздела.

Объемные волны бывают двух типов: продольные и поперечные. Продольные являются упругими волнами сжатия, а поперечные — упругими волнами сдвига. Объемные волны подчиняются законам геометрической оптики, отражаясь и преломляясь у поверхностей раздела, где их скорость изменяется. Скорости этих волн определяются формулами

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (2.1)$$

где V_P и V_S — скорости продольных и поперечных волн, K — модуль всестороннего сжатия, μ — модуль сдвига, ρ — плотность.

Из этих формул видно, что скорость продольных волн выше скорости поперечных волн (в среднем в 1,7 раза). Соответственно продольные волны регистрируются на сейсмограммах раньше поперечных. Поэтому продольные волны получили название первичных (primary, P), а поперечные — вторичных (secondary, S).

Объемные сейсмические волны в буквальном смысле слова просвечивают нашу планету и, подобно рентгену, позволяют выявить внутреннее строение Земли без непосредственного проникновения в ее недра.

Упругие сейсмические волны регистрируются сейсмографами, в зависимости от конструкции которых записывается либо смещение почвы, либо скорость смещения. Короткопериодные приборы ($T \sim 1$ с) используются для обнаружения объемных волн, а длиннопериодные ($T > 15$ с) — для обнаружения поверхностных волн.

Источник сейсмических волн имеет обычно протяженность 10–100 км. У микроземлетрясений он уменьшается до 1 км, а у катастрофических достигает 1000 км. При теоретическом рассмотрении он представляется «точкой», которая называется фокусом или гипоцентром. Точка на поверхности Земли — проекция фокуса по вертикали вверх — называется эпицентром. Большинство очагов землетрясений расположено на глубинах

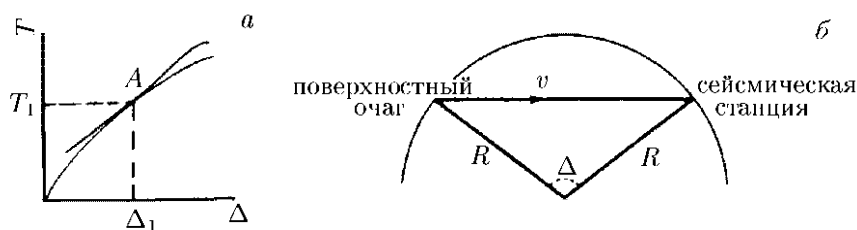


Рис. 2.1. Схема годографа $T(\Delta)$ (а) и схема распространения сейсмического луча (R — радиус Земли, Δ — эпицентрального расстояния) (б)

менее 100 км, но известны землетрясения, происходящие на глубинах до 700 км. Местоположение гипоцентра и эпицентра землетрясений определяется по времени прихода сейсмических волн. Зависимость времени пробега T от эпицентрального расстояния Δ называется годографом (рис. 2.1, а). Для случая однородной Земли на рис. 2.1, б приведена схема хода сейсмического луча к сейсмической станции. Точка A на рис. 2.1, а определяет сейсмический луч, проходящий расстояние Δ_1 за время T_1 . Пусть в точке A производная $\frac{dT}{d\Delta}$ равна P_1 . Задача сейсмологии состоит в том, чтобы перейти от графической зависимости $T'(\Delta)$ к зависимости сейсмической скорости от радиуса $V(r)$, так как информацию о внутреннем строении Земли дает распределение скоростей сейсмических волн по глубине. В сейсмологии разработаны различные способы этого перехода. Для определения координат очага необходима регистрация прихода волн на нескольких сейсмостанциях (не менее 4). Последние усовершенствования мировой сети сейсмостанций и применение ЭВМ значительно повысили точность определения очагов землетрясений.

До 50-х гг. наибольшее число открытий в сейсмологии было сделано в результате измерений времени пробега объемных волн землетрясений. Предполагалось, что Земля обладает радиальной симметрией и потому можно использовать множество различных землетрясений, чтобы построить годограф волн P и S для последовательного ряда возможных эпицентральных расстояний от 0 до 180° .

Как уже упоминалось, Земля имеет ядро, мантию и кору. Исторически первым было открыто центральное ядро Земли: в 1906 г. Олдгем обнаружил, что волны P вблизи эпицентрального расстояния 180° приходят значительно позже, чем этого можно было ожидать (рис. 2.2). Такая задержка волн вызвана их

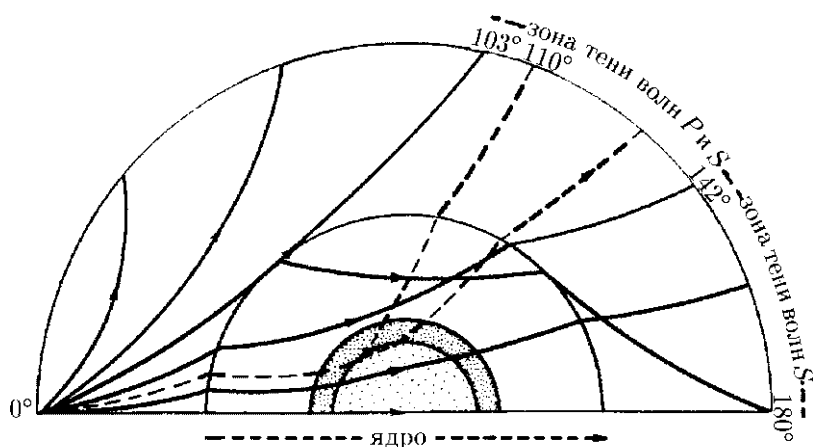


Рис. 2.2. Некоторые пути P -волн, проходящих сквозь Землю. Штриховые линии изображают слабые P -волны, выходящие в зоне тени (по Гутенбергу)

прохождением через ядро с пониженной скоростью. Это открытие было затем подтверждено более детальными исследованиями. Волны P и S наблюдаются до $\Delta = 103^\circ$, причем их скорость возрастает с глубиной по мере прохождения волны через оболочку (мантию) Земли. Между 103° и 142° волны обычно исчезают: создается «зона тени». От 142° до 180° появляется более поздняя волна P , а волна S отсутствует. Из этого следует, что приблизительно на половине пути до центра Земли существует резкая граница раздела, ниже которой скорость волны P внезапно уменьшается, а волна S исчезает. Известно, что поперечные волны не распространяются в жидкости, так как там модуль сдвига $\mu = 0$. Следовательно, полученные результаты указывают на существование жидкого ядра, выше которого лежит оболочка (или мантия) Земли, вещество которой находится в твердом состоянии.

Глубину границы раздела ядро–мантия (2900 км) впервые определил немецкий сейсмолог Гутенберг в 1914 г., в связи с чем эта граница названа его именем. На границе Гутенберга V_P скачком уменьшается от 13,6 до 8,1 км/с. Скорости поперечных волн V_S соответственно уменьшаются от 7,3 км/с до 0 (рис. 2.3). Плотность в ядре возрастает от 5,5 (в оболочке) до 10 г/см³.

Вторую отчетливая поверхность раздела, на малой глубине, была открыта югославским сейсмологом Мохоровичичем при изучении сейсмограмм землетрясений в Югославии 8 октября

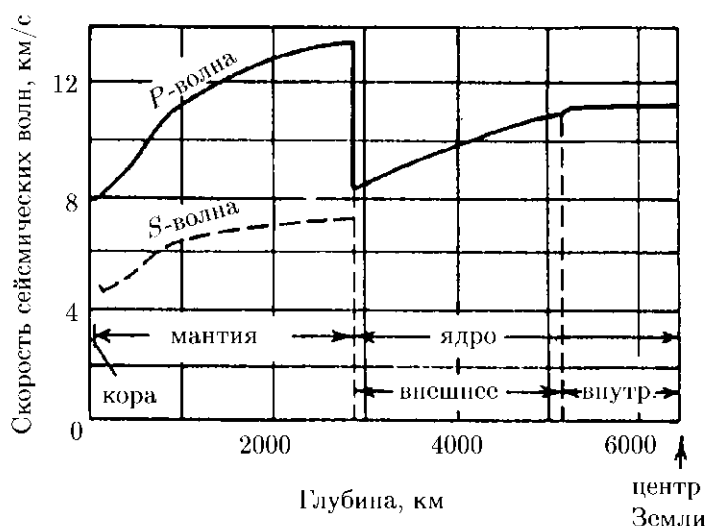


Рис. 2.3. Распределение скоростей волн P и S внутри Земли по модели Джеффриса Гутенберга

1909 г., записанных на расстоянии нескольких сотен километров от эпицентра. На этой границе, получившей название Мохо, скачкообразно возрастают скорости и плотность. В связи с этим открытием земной корой стал называться слой, расположенный выше границы Мохоровичича, Мохо или просто M . Толщина земной коры неодинакова в разных частях поверхности Земли: она изменяется от 10 км (с учетом толщи воды) в океанических областях до 70 км в горных районах континентов. Вклад земной коры в полную массу и момент инерции Земли мал, поэтому при рассмотрении Земли в целом земную кору представляют в виде однородного слоя толщиной 35 км.

Согласно сейсмическим данным, наибольшей плотностью из трех областей Земли обладает ядро. Это соответствует данным о средней плотности Земли ($5,517 \text{ г/см}^3$) и плотности пород коры, равной $2,8 \text{ г/см}^3$ (граниты) и $3,0 \text{ г/см}^3$ (базальты). Отсюда следует предположение, что в глубоких недрах Земли должны существовать породы с очень высокой плотностью.

На рис. 2.3 представлено распределение скоростей волн P и S внутри Земли. Более детальные сейсмические исследования позволили обнаружить слой пониженных скоростей (волновод) в верхней части мантии, а также переходную зону в мантии (400–1000 км), в которой наблюдался быстрый рост скоростей V_P и V_S .

Выше переходной зоны была выделена верхняя мантия, а ниже — нижняя мантия.

В 1936 г. датский сейсмолог госпожа Леманн обнаружила быстрое увеличение скорости P -волн внутри ядра на глубине около 5000 км из наблюдения слабых вступлений волн P в зоне между $\Delta = 110^\circ$ и $\Delta = 143^\circ$. Эти вступления можно было объяснить только сильным увеличением скорости внутри ядра. Тем самым была установлена еще одна граница раздела, известная как переходная зона в ядре, которая отделяет внешнее ядро с малыми скоростями P -волн от внутреннего ядра с большими скоростями P -волн. По современным представлениям внутреннее ядро является твердым в противоположность жидкому внешнему.

Австралийский геофизик Буллен, анализируя распределение скоростей сейсмических волн внутри Земли, разделил всю Землю на семь концентрических зон и дал им буквенные обозначения (рис. 2.4). Подразделения Буллена служат основой для большинства дискуссий о физических и химических свойствах земных недр.

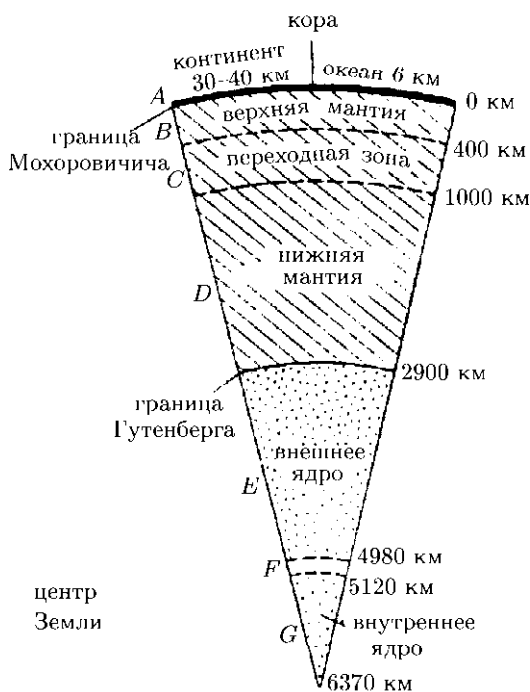


Рис. 2.4. Семь концентрических зон внутри Земли (схема Буллена)

Годограф и траектории объемных сейсмических волн

Из рис. 2.1, б видно, что время пробега P -волн определяется по формуле

$$T = 2 \frac{R}{v} \sin \frac{\Delta}{2},$$

где T — время пробега, v — скорость сейсмической волны, Δ — эпицентральное расстояние, R — радиус Земли.

В связи с увеличением скоростей с глубиной (неоднородное строение Земли) сейсмические лучи искривляются. Выводы, которые можно сделать о деталях строения Земли, зависят от точности определения времени пробега. Проверка определения времени пробега возможна по записям волн от ядерных или других искусственных взрывов, местоположение, время и глубина которых известны и их не нужно определять по вступлениям сейсмических волн. Полные таблицы времен пробега составлены Гутенбергом, Джеффрисом и Булленом и, несмотря на 50-летнюю давность, остаются лучшими для Земли в целом. Соответствующие годографы приведены на рис. 2.5. Большое число ветвей годографов появляется из-за отражения и обмена волн P и S на границе мантии и ядра и на поверхности Земли. При точных расчетах времен пробега в таблицы нужно вводить поправки на сжатие, которое убывает с глубиной.

На границе раздела в недрах Земли возникают новые волны различных типов. Так, поперечная волна на границе расщепляется на поперечные волны двух типов: волны SH и SV . В поперечной волне типа SH вектор смещения лежит в плоскости границы раздела, эти волны не интерферируют с P -волнами и поперечными SV -волнами, вектор смещения которых лежит в плоскости, содержащей луч и перпендикулярной к границе. В результате при прохождении границы SH -волна дает преломленную и отраженную волны только типа SH , а SV - и P -волны в общем случае дают четыре волны: отраженные и преломленные SV - и P -волны каждая. Так появляются обменные волны. Для каждого типа волн при прохождении границы отношение $\sin i$ (i — угол падения) к скорости v остается постоянным:

$$\frac{\sin i}{v} = \text{const.} \quad (2.2)$$

Отсюда получается

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{v}{v'}, \quad (2.3)$$

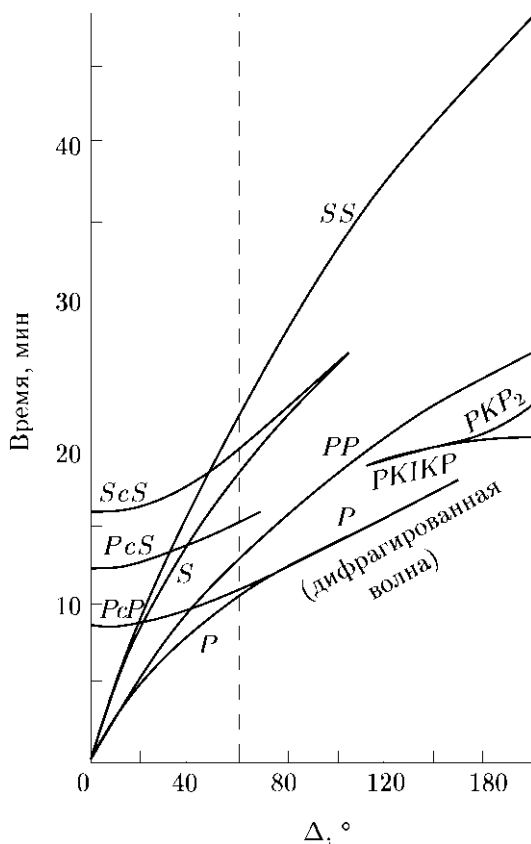


Рис. 2.5. Годографы Джеффриса некоторых объемных сферических волн

где i' — угол преломления, v и v' — скорости волны по обе стороны границы. Угол $e = \frac{\pi}{2} - i$ называется углом выхода сейсмического луча.

На сейсмограмме обычно регистрируется ряд фаз, каждая из которых связана с распространением волн по определенному типу пути. Стандартные обозначения различных типов лучей показаны на рис. 2.5. Так, продольная волна, испущенная из очага в сторону от земной поверхности, обозначается P , а к земной поверхности — p . После первого отражения от земной поверхности она может остаться продольной волной PP или перейти в поперечную волну PS . Аналогичный смысл имеют индексы волн S , SS , SP и т. д. Символ s употребляется для

указания на отражение волны от границы земного ядра. Получаются фазы PcP , ScS , ScP и др. Буква K используется для обозначения отрезка пути P -волны во внешнем жидком ядре. Так, фаза PKS соответствует волне, которая изначально была P -волной, такой же прошла внешнее ядро, а затем преломилась из ядра в мантию, перейдя в волну S -типа, и, уже не изменяясь, вышла на земную поверхность.

Буквой i обозначается отражение волны вверх от границы внутреннего ядра, а буквами I и J — участки пути волн P и S в твердом внутреннем ядре Земли. Так возникают фазы $PKiKP$, $PKIKP$, $PKJKP$. Некоторые из них показаны на рис. 2.5. Если сейсмограф расположен на эпицентральной расстоянии $\Delta = 60^\circ$, то первой он зарегистрирует прямую P -волну, затем волну PcP (P -волна, отраженная от земного ядра), далее на сейсмограмме появится PP -волна (P -волна, отразившаяся от земной поверхности), за ней будет записана первая поперечная волна PcS (обменная волна, возникшая при отражении прямой P -волны от земного ядра), наконец приходит прямая S -волна. Скорость P -волны $V_P = 1,7V_S$, поэтому и время пробега S -волн T_S соответственно больше времени пробега T_P приблизительно в 1,7 раза. Затем последовательно вступают поперечные волны ScS и SS , отраженные от ядра и поверхности Земли.

На расстоянии $\Delta > 80^\circ$ прямые и отраженные волны P и PcP (S и ScS) становятся близкими и постепенно накладываются одна на другую. На эпицентральных расстояниях $\Delta \geq 103^\circ$ пропадают прямые S - и P -волны. Это зона «тени» от земного ядра. Зона тени для прямых P -волн протягивается до $\Delta \approx 142^\circ$, когда впервые появляются волны PKP_2 , прошедшие через внешнее жидкое ядро. Наконец, последний годограф на рис. 2.5 — фаза $PKIKP$, которая соответствует продольной волне, появляющейся в зоне тени P -волн на расстоянии $\Delta \approx 110^\circ$. Эта фаза обязана своим существованием твердому внутреннему ядру, сильные преломляющие свойства которого и завернули луч $PKIKP$ в зону тени. Обнаружение этой «неожиданной» фазы на сейсмограммах в зоне тени привело в 1936 г., как уже упоминалось, датского сейсмолога Леманн к открытию внутреннего ядра Земли.

Переход от годографа к скоростному разрезу для объемных волн

Для получения информации о внутреннем строении Земли необходимо статистически обработать данные о временах пробега волн от многих землетрясений к многочисленным сейсмическим

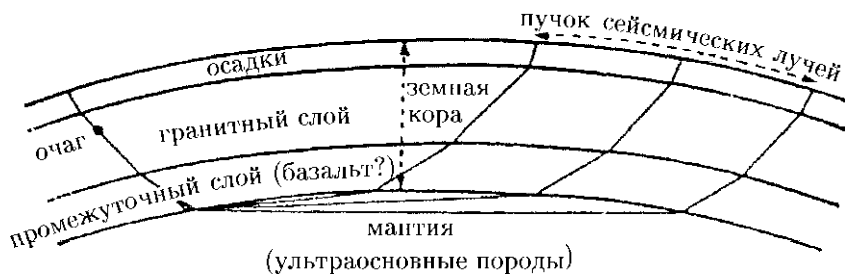


Рис. 2.6. Ход сейсмического луча от ближайшего землетрясения в слоистой земной коре

станциям. Следующей задачей является нахождение зависимости сейсмической скорости от радиуса Земли, так как именно скорость волн непосредственно связана с характеристиками среды. Способ такого перехода впервые был найден Герглотцем в 1907 г.

Ход сейсмических лучей от близкого землетрясения можно изобразить сравнительно просто (рис. 2.6). Учтем слоистость коры: осадочный слой с очень малыми скоростями s -волн (сейсмических волн) и большим поглощением, гранитный слой и «промежуточный» слой, по-видимому, состоящий из базальтов. Ниже идет мантия, которая отделяется от коры границей Мохо. Такая модель коры удобна для исследования ее строения на материках. Местные особенности строения коры изучаются методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) с помощью взрывов, а более общие черты — по дисперсии поверхностных волн.

В коре под океанами гранитный слой отсутствует, толщина океанской коры около 5 км.

Времена пробега волн от близких землетрясений можно рассматривать при помощи пучков s -лучей. Пучками называются лучи, для которых точки наибольшего проникновения в глубину находятся в одном и том же слое (в верхней мантии, как показано на рис. 2.6). Преломление происходит таким образом, что отрезки лучей во всех слоях, кроме самого нижнего, почти одинаковы. Поэтому изменение времени пробега в зависимости от эпицентрального расстояния определяется разностью отрезков лучей в нижнем слое. Скорость в нижнем слое равна

$$v = \frac{dL}{dt} = R \frac{d\Delta}{dt},$$

где $L = R\Delta$ — эпицентральное расстояние, R — радиус Земли.

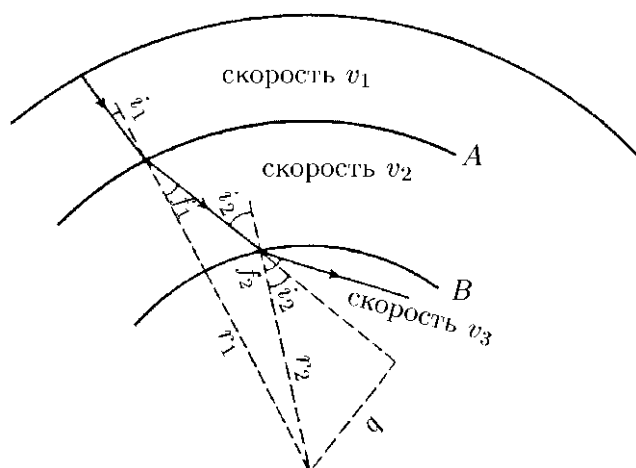


Рис. 2.7. Схема распространения сейсмического луча в трехслойной модели Земли. A и B — границы между слоями

Булленом получено уравнение годографа для волн от удаленных землетрясений, дающих сведения о глубоких частях Земли. Если при рассмотрении близких землетрясений поверхность Земли можно считать плоской, то для волн удаленных землетрясений следует учитывать сферичность Земли. Слои Земли не обязательно разделены резкими границами, но при выводе уравнения годографа Буллен исходил из такого предположения. Рассмотрим, следуя Буллену и Стейси, основные свойства сейсмического луча.

На рис. 2.7 показан луч в трехслойной модели Земли при условии, что скорость в более глубоком слое больше. Однако вывод пригоден и для модели, в которой скорость v убывает с глубиной так медленно, что $\frac{dv}{dr} < \frac{v}{r}$ (r — расстояние слоя от центра Земли). При этом условии годограф непрерывен и даст возможность *однозначно* определить $v(r)$. В реальной Земле в верхней мантии и у границы ядро-мантии $\frac{dv}{dr} > \frac{v}{r}$.

Применяя законы Снеллиуса к границам A и B , получим

$$\frac{\sin i_1}{v_1} = \frac{\sin f_1}{v_2}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\sin i_2}{v_2} = \frac{\sin f_2}{v_3}. \quad (2.5)$$

Из двух треугольников имеем

$$q = r_1 \sin f_1 = r_2 \sin i_2. \quad (2.6)$$

Таким образом,

$$\frac{r_1 \sin i_1}{v_1} = \frac{r_1 \sin f_1}{v_2} = \frac{r_2 \sin f_2}{v_3}. \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) можно распространить на случай преломления при любом числе границ и на случай рефракции в слое с непрерывным нарастанием скорости с глубиной. Следовательно, вдоль каждого луча выполняется соотношение

$$\frac{r \sin i}{v} = \text{const} = p. \quad (2.8)$$

Здесь i — угол между лучом и радиусом в данной точке. Величина p называется параметром луча и сохраняется для всех точек одного и того же луча. Определяя параметр луча, мы тем самым находим величину $\frac{r}{v}$ в точке, где $\sin i = 1$, т.е. в точке наибольшего проникновения луча.

Другая важная формула для параметра p получается из простого геометрического рассмотрения бесконечно близких лучей PP' и QQ' (рис. 2.8). Отрезок PN — нормаль, опущенная из PP' на QQ' , т.е. фронт волны. Разность времен пробега по путям PP' и QQ' будет равна

$$dT = \frac{2QN}{v_0}, \quad (2.9)$$

где v_0 — скорость сейсмических волн у поверхности,

$$QN = PQ \sin i_0 = \frac{1}{2} r_0 d\Delta \sin i_0.$$

Отсюда получаем

$$\frac{dt}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{v_0} = p. \quad (2.10)$$

Так как значения T , Δ , полученные из наблюдений, приведены в опубликованных таблицах, то можно определить $\frac{dT}{d\Delta}$. Таким образом, устанавливается связь между p и расстоянием Δ . Для того чтобы перейти к скоростному разрезу, необходимо эпицентральное расстояние представить в виде интеграла. Введем

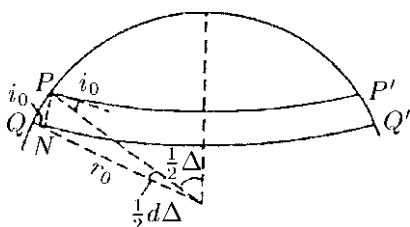


Рис. 2.8. Распространение двух бесконечно близких сейсмических лучей PP' и QQ'

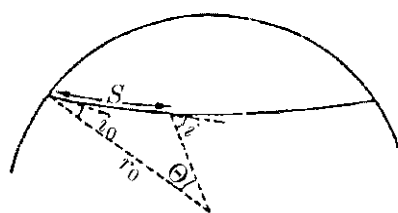


Рис. 2.9. Схема для вывода выражения для $\sin i$

следующее соотношение:

$$p = \frac{r \sin i}{v} = \frac{r}{v} \frac{r d\Theta}{ds}, \quad (2.11)$$

где Θ и s — величины, показанные на рис. 2.9. Далее

$$ds^2 = dr^2 + (r d\Theta)^2. \quad (2.12)$$

Исключая ds из (2.11) при помощи (2.12), получим

$$\left(\frac{r^2 d\Theta}{pv} \right)^2 = dr^2 + dr^2 + (r d\Theta)^2. \quad (2.13)$$

Введем обозначение $\eta = \frac{r}{v}$, тогда найдем

$$\frac{d\Theta}{dr} = \frac{p}{r} \sqrt{\eta^2 - p^2}. \quad (2.14)$$

Интегрируя от самой глубокой точки луча r' до поверхности r_0 , получаем

$$\frac{\Delta}{2} = \int_{r'}^{r_0} \frac{p dr}{r \sqrt{\eta^2 - p^2}}. \quad (2.15)$$

Величины Δ и p находятся из наблюдений, и поэтому (2.15) представляет собой интегральное уравнение, решая которое, можно определить η (и, следовательно, v) как функцию r .

Упрощенный способ решения (2.15) приведен в книге [124]. Окончательное решение имеет вид

$$\int_0^{\Delta_1} \operatorname{arch} \left(\frac{p}{p_1} \right) d\Delta = \pi \ln \left(\frac{r_0}{r_1} \right). \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) позволяет найти значение r_1 , соответствующее Δ_1 , а следовательно, и $\eta_1 = \frac{r_1}{v_1}$.

Таким образом, получается зависимость $v(r)$, справедливая до самой глубокой точки проникновения луча (этот вывод не относится к случаю быстрого роста v , когда $\frac{dv}{dr} > \frac{v}{r}$).

В большей части земных недр скорости s -волн медленно растут с глубиной, и тогда можно пользоваться уравнением (2.16). Однако, если существуют слои с быстрым возрастанием скорости с глубиной, то получается более сложная картина лучей и усложняется годограф. Рассмотрим некоторые случаи, следуя [124].

Если возрастание скорости происходит весьма быстро (рис. 2.10, а), то годограф имеет вид, показанный на рис. 2.10, б.

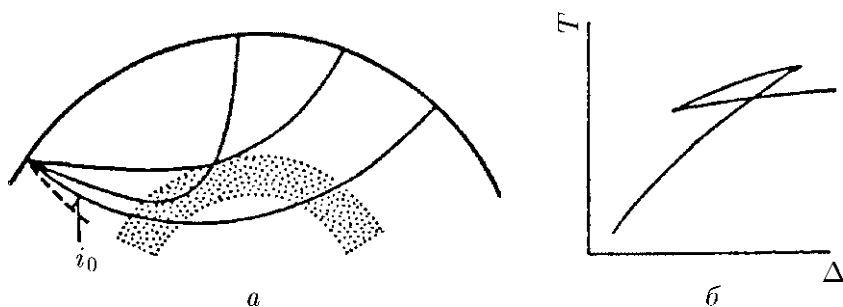


Рис. 2.10. Схема хода s -лучей с возрастающей скоростью (а) и их годограф (б)

В некотором интервале изменения параметра p , т. е. в некотором интервале значений $\sin i_0$, оказывается, что с уменьшением i_0 расстояние Δ не увеличивается, а убывает. На годографе появляется петля.

Слой, в котором скорость убывает с глубиной, вызывает искривление лучей, схематически показанное на рис. 2.11, а. В этом случае оказывается, что существует интервал глубин, на котором нет точек наибольшего проникновения лучей, и некоторый интервал эпицентральных расстояний Δ , на котором либо вступления волн очень слабы, либо их вообще не удастся обнаружить (рис. 2.11, б). Существование нескольких типов лучей позволяет производить взаимный контроль определения скорости по каждой из волн. Так, например, скорости продольных волн

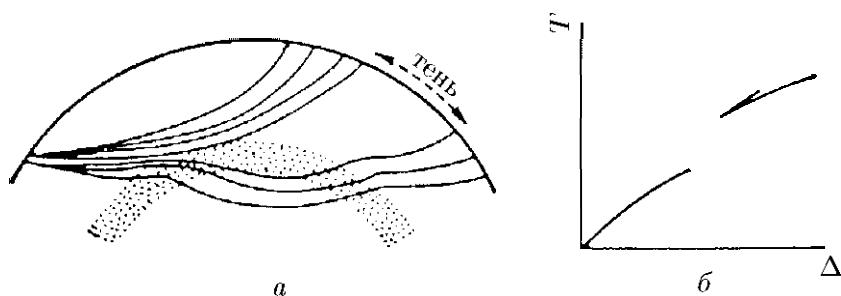


Рис. 2.11. Схема хода s -лучей с убывающей скоростью (а) и их годограф (б)

в ядре Земли должны получаться одинаковыми по годографам волн PKP и SKS .

Определение плотности земных недр по скоростям сейсмических волн

Как показывают формулы (2.1), скорости волн P и S определяются отношениями модуля сдвига к плотности $\frac{\mu}{\rho}$ и модуля сжатия к плотности $\frac{K}{\rho}$. Эти параметры внутри Земли неизвестны. Поэтому скорости сейсмических волн непосредственно не дают возможности быстро и надежно оценить плотность. Однако, поскольку изменения упругих свойств и плотности обычно происходят одновременно и примерно в одинаковой степени, изменения скоростей волн можно использовать в качестве критериев изменения плотности.

Первый и наиболее существенный шаг на пути построения реальной модели распределения плотности внутри Земли (тем самым и модели самой Земли) сделали американские геофизики Адамс и Вильямсон в 1923 г. Они предложили использовать для определения плотности сейсмический параметр $\Phi = \frac{K}{\rho}$, который легко определяется через скорости сейсмических волн V_P и V_S :

$$\Phi = \frac{K}{\rho} = V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2. \quad (2.17)$$

Так как благодаря скоростному разрезу нам известны зависимости V_P и V_S от глубины, то тем самым известен и параметр Φ

как функция глубины. Модуль сжатия K по определению равен

$$K = \rho \frac{\Delta P}{\Delta \rho}, \quad (2.18)$$

где ΔP и $\Delta \rho$ — соответствующие приращения давления и плотности. При известном Φ можно определить закон приращения плотности при небольших приращениях давления:

$$\Delta \rho = \frac{1}{\Phi} \Delta P. \quad (2.19)$$

Теперь для решения поставленной задачи надо знать закон нарастания давления в недрах Земли. При гидростатическом давлении приращение ΔP при увеличении глубины на Δl равно весу вещества этого слоя, приходящегося на единицу площади:

$$\Delta P = \rho g \Delta l. \quad (2.20)$$

Исключая ΔP из (2.19) и (2.20), получим уравнение Адамса–Вильямсона:

$$\Delta \rho = \frac{\rho g}{\Phi} \Delta l, \quad (2.21)$$

позволяющее определить детальное распределение плотности в недрах Земли и, соответственно, получить реальную плотностную модель Земли. При решении уравнения (2.21) вместе с распределением $\rho(l)$ автоматически определяется и $g(l)$.

Существует ряд сложностей при определении плотности внутри Земли по уравнению Адамса–Вильямсона. Эти трудности связаны с наличием в недрах границ разрыва, фазовых переходов и т. п. Учет этих сложностей различными способами в последние десятилетия дал возможность построить очень детальное распределение плотности в верхней мантии Земли и далее до границы мантии с ядром.

Собственные колебания Земли

После сильнейшего Чилийского землетрясения в мае 1960 г. на записях, сделанных несколькими очень длиннопериодными сейсмографами в разных точках земного шара, волны с очень длинными периодами четко наблюдались в течение многих дней. Эти волны являются собственными колебаниями Земли, которые могут быть вызваны землетрясениями достаточно большой энергии. Известный математик А. Е. Г. Ляв еще в 1911 г. теоретически рассчитал, что стальной шар размером с Землю будет иметь период основного колебания около 1 ч. Однако впервые колебание с периодом 57 мин было обнаружено Беньоффом после сильнейшего землетрясения на Камчатке 4 ноября 1952 г.

Самый большой период собственных колебаний Земли по данным измерений после Чилийского землетрясения составил 54 мин. Кроме того, было отмечено много пиков более быстрых колебаний. Периоды собственных колебаний определяются физическими свойствами вещества в недрах Земли. Следовательно, любая модель Земли с априори заданными свойствами должна иметь теоретический спектр собственных колебаний, близкий к экспериментально наблюдаемому (рис. 2.12).

К сожалению, по наблюдаемому спектру мы не можем непосредственно определить физические свойства недр, так как такая задача относится к классу обратных геофизических задач и не имеет однозначного решения. Поэтому, опираясь на данные наблюдений колебаний, надо попытаться построить такую модель структуры и упругих свойств недосигаемых для нас недр, у которой частоты отдельных мод колебаний согласуются с наблюдаемыми. Из сказанного ясно, какое огромное значение имеет открытие собственных колебаний Земли; этот раздел можно назвать земной спектроскопией.

Существует два независимых типа собственных колебаний упругого шара. К первому относятся так называемые моды S , или сфероидальные колебания, при которых смещения частиц шара в общем имеют как радиальную, так и горизонтальную составляющие. Ко второму типу (моды T) относятся крутильные колебания. Смещения при колебаниях данного вида направлены по касательной и не имеют радиальной составляющей. Сфероидальные и крутильные колебания происходят совместно, и поэтому смещение в каждой точке поверхности представляет собой смесь колебаний обоих типов.

На рис. 2.13 представлены основные моды собственных колебаний. Для крутильных колебаний T с помощью индексов n и l обозначается число узловых линий ${}_nT_l$. Индекс n относится к количеству узловых поверхностей внутри Земли, а индекс l равен числу ограниченных этими поверхностями секторов на поверхности Земли ($l = n + 1$).

Простейшему крутильному колебанию ${}_0T_2$ (рис. 2.13, а) соответствует только одна поверхность, секущая поверхность Земли по экватору, относительно которой Северное и Южное полушария «закручиваются» в противоположных направлениях. Аналогичные движения должны быть и в недрах Земли. Мода ${}_0T_2$ является основным крутильным колебанием Земли. На рис. 2.13, б изображен первый радиальный обертоп ${}_1T_2$ основной моды T . В этом случае Земля разделена на четыре области, в каждой из

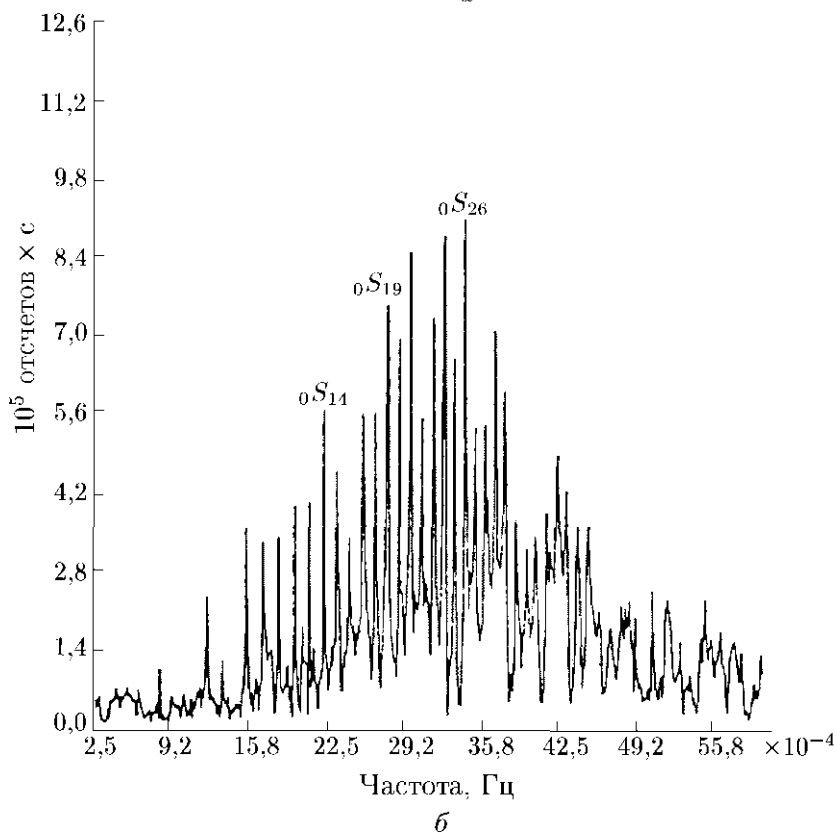
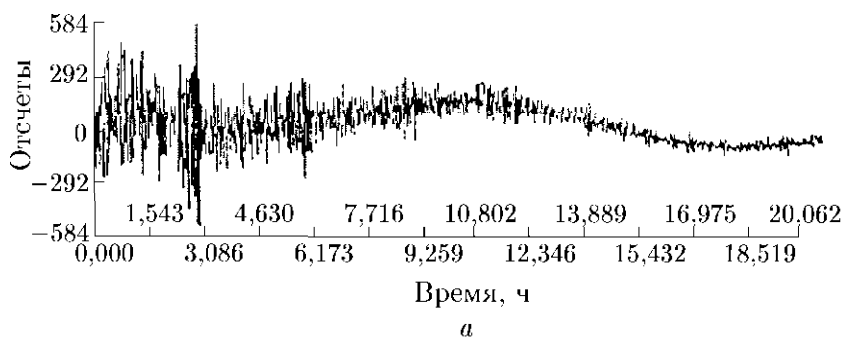


Рис. 2.12: а) запись собственных колебаний Земли на сейсмограмме землетрясения в Индонезии 19 августа 1977 г. (магнитуда 7,9); б) частотный спектр, рассчитанный по сейсмограмме (по Болту)

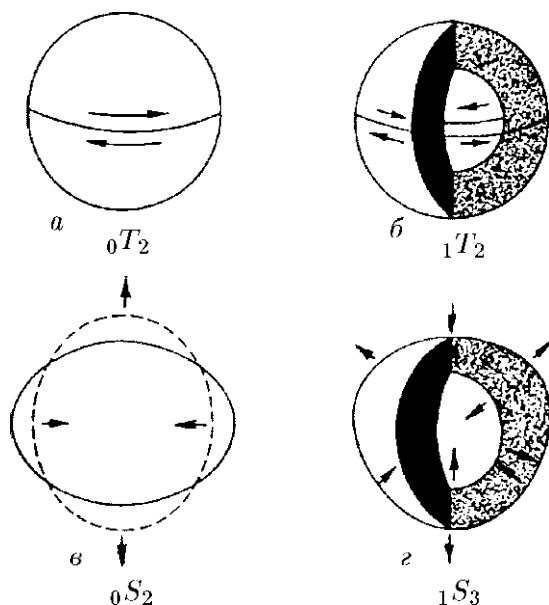


Рис. 2.13. Схематическое изображение мод собственных колебаний Земли (по Болту)

которых движение имеет различное по отношению к соседней области направление.

При сфероидальных колебаниях S смещения имеют еще и вертикальную составляющую. Колебания основной моды $0S_2$ напоминают чередующиеся выгибания и прогибания упругого мяча (рис. 2.13, в). В этом случае имеются две узловые линии на поверхности, которые для моды $0S_2$ совпадают с параллелями Северного и Южного полушарий (индекс l для S -колебаний равен числу узловых линий на поверхности).

На рис. 2.13, г изображена схема колебаний первого радиального обертона $1S_3$.

Тот факт, что найденный по наблюдениям период собственного колебания Земли (54 мин для моды $0S_2$) на 6 мин меньше теоретического, указывает на меру отклонения реальной Земли от однородной модели. Период чисто радиальных колебаний $0S_0$ равен 25,5 мин. В спектре крутильных мод nT_l имеются колебания, близкие по периодам к сфероидальным. Например, периоды мод $0T_2$ и $0S_{19}$ равны 360,3 и 360,2 с. Для того чтобы извлечь пользу из все более точных наблюдений, которыми располагает современная сейсмология, необходимо как можно детальнее описывать сами спектры колебаний.

Важные сведения о неупругих свойствах глубоких частей Земли получаются из наблюдений затухания собственных колебаний. Если принять, что механическая добротность вещества мантии Q не зависит от частоты, то значения Q , получающиеся по наблюдениям, показывают, что для нижних частей мантии Q больше, чем для верхних. Особый интерес представляет чрезвычайно большое $Q > 25\,000$ для колебаний ${}_0S_0$. Из этого факта делается вывод о том, что поглощение упругих волн происходит в основном вследствие деформации сдвига.

Поверхностные волны

Поверхностные волны возникают под действием объемных сейсмических волн при их выходе на поверхность Земли. Поверхностные волны могут также возникать на границах раздела двух сред внутри Земли. Эти волны бывают двух типов: волны Рэлея и волны Лява. Свое название они получили от имен ученых, которые впервые создали теорию этих волн (Рэлей в 1885 г., Ляв в 1911 г.)

В рэлеевской волне смещение частиц почвы происходит в вертикальной плоскости, а сами частицы описывают эллипс, двигаясь против часовой стрелки (рис. 2.14, а).

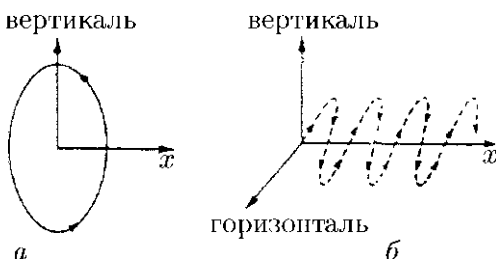


Рис. 2.14. Схема смещений частиц почвы в волнах Рэлея (а) и Лява (б)

В волнах Лява смещение частиц происходит в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению распространения волн (рис. 2.14, б). Величина смещения в обоих типах волн максимальна на поверхности и экспоненциально убывает с глубиной. Поэтому с помощью этих волн можно эффективно зондировать Землю до глубины, приблизительно равной одной трети длины волны. Длины поверхностных волн, возбуждаемых при землетрясениях, лежат в интервале от десятков до многих сотен километров. Поверхностные волны от сильных землетрясений настолько интенсивны, что по нескольку раз обегают вокруг земного шара. Эти волны позволяют получать много информации о

недрах планеты по измерениям на небольшом числе сейсмостанций. Они очень удобны при сейсмическом зондировании Луны и других планет. С помощью поверхностных волн детально изучено расположение слоя пониженных скоростей в верхней мантии, строение земной коры континентов и океанов и другие детали регионального строения наружных слоев Земли.

В отличие от объемных скорость поверхностных волн зависит от частоты (дисперсия). Именно это свойство поверхностных волн используется для изучения строения неглубоких слоев Земли. При наличии дисперсии существуют различия фазовой и групповой скоростей волн. Зависимости фазовых и групповых скоростей от периода поверхностной волны T называются дисперсионными кривыми. Изучение глубинных слоев Земли основано на сравнении рассчитанных теоретически дисперсионных кривых для некоторых моделей изучаемого региона с кривыми, полученными из наблюдений. Исследования показывают, что дисперсия скоростей волн Рэлея и Лява очень велика и, следовательно, метод поверхностных волн является мощным средством изучения глубинного строения наружных слоев Земли.

Интенсивность землетрясений, сейсмичность

Землетрясения различают по интенсивности, происхождению, глубине очага.

Интенсивность землетрясений в России и в большинстве других стран оценивается по 12-балльной шкале. Землетрясение силой в 1 балл не ощущается, а отмечается только приборами. Землетрясение в 12 баллов является сильной катастрофой. Наблюдаются тяжелые разрушения всех сооружений, изменение русел рек, образование водопадов. Происходят сильные изменения рельефа местности на больших пространствах. На поверхности грунта видны волны, подобные морским. Иногда наблюдаются подбрасывание отдельных предметов.

По происхождению землетрясения бывают тектонические, вулканические, обвальные. По глубинам очагов землетрясения делятся на обыкновенные (< 70 км), промежуточные (70–300 км) и глубокие (300–700 км).

Количественную оценку силы землетрясения можно выразить отношением $\frac{\alpha}{g}$ (коэффициент сотрясения), где $\alpha = \frac{4\pi^2 a}{T^2}$ — амплитуда ускорения почвы при гармоническом колебании:

$$x = a \sin \frac{2\pi}{T} t$$

(a — амплитуда смещения почвы); α может быть измерена непосредственно специальными приборами.

Б. Б. Голицын предложил оценивать энергию землетрясения на расстоянии Δ по формуле

$$F_{\Delta} = \frac{E}{2\pi\Delta^2} e^{-k\Delta}, \quad (2.22)$$

где E — энергия колебания в очаге, k — эмпирическая константа.

Под сейсмичностью подразумевается географическое распределение землетрясений, их связь со строением земной поверхности и распределение по энергиям или магнитудам.

Рассмотрим главные закономерности распределения землетрясений по земному шару (рис. 2.15).

Наибольшая сейсмическая активность наблюдается в Тихоокеанском поясе. Согласно таблицам Гутенберга и Рихтера, в нем выделилось 75,4% энергии неглубоких землетрясений, происшедших с 1904 по 1952 г., 22,9% — в Трансазиатской, или Альпийской зоне, протянувшейся от Индонезии через Гималаи к Средиземноморью. На остальную часть земного шара приходится менее 2%. Энергия, выделяющаяся при промежуточных и глубоких землетрясениях, в еще большей степени концентрируется в Тихоокеанском поясе.

Наибольшая сейсмичность проявляется у дугообразных структур на земной поверхности. Такую форму в наиболее интересных случаях имеют расположенные рядом океанические желоба, цепочки вулканических островов. К последним приурочены аномалии силы тяжести, а очаги землетрясений располагаются здесь вдоль плоскости, уходящей в глубь Земли под углом 45° .

Вообще география землетрясений очень пестра. Даже в европейских странах, которые по современным представлениям стабильны в сейсмическом отношении, время от времени бушуют серьезные подземные бури. Прежде всего, это относится к странам побережья Северного моря, Бельгии, Швейцарии и другим странам Европы. До настоящего времени землетрясений не наблюдалось только в Антарктиде, несмотря на то, что там есть и молодые горы и действующие вулканы. Это — своего рода сейсмологическая загадка.

Глубокофокусные землетрясения происходят реже и сконцентрированы в более ограниченных зонах, чем мелкофокусные. Практически все глубокие землетрясения происходят в Тихоокеанском поясе. Самый глубокий толчок зафиксирован на глубине 720 км; более глубокие части Земли абсолютно асейсмичны.

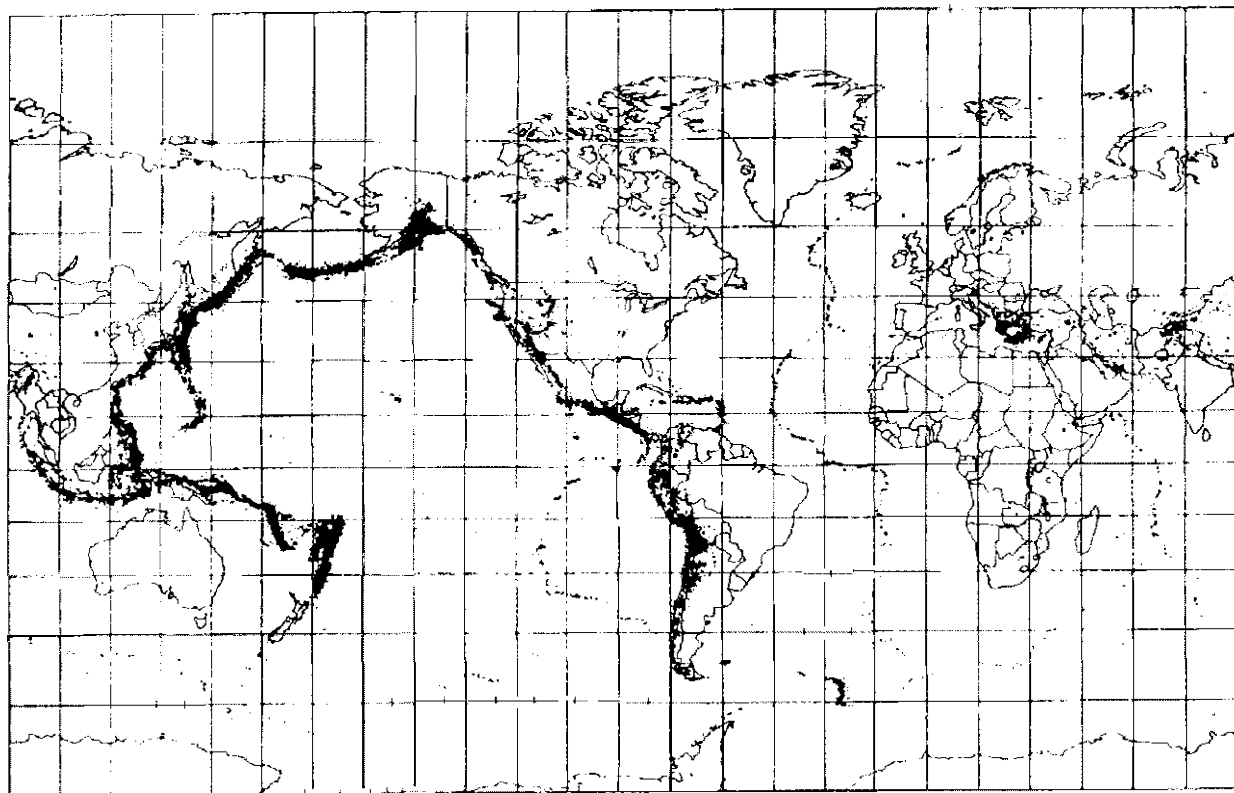


Рис. 2.15. Географическое распределение землетрясений (черные точки)

Создается впечатление, что все землетрясения вплоть до глубины 720 км связаны с общей системой движений, происходящих в мантии и коре. Распределение землетрясений по поверхности Земли показывает, что глубокие и поверхностные землетрясения приурочены к одним и тем же географическим районам. Возможно, все они определяются общим глубинным механизмом.

Магнитудой землетрясения называется его численная характеристика, определяемая по амплитудам сейсмических волн, рождающихся в очаге. Магнитуда для поверхностных волн обозначается как M , для объемных волн — m . Впервые шкала магнитуд предложена Рихтером. В дальнейшем она была усовершенствована. Магнитуду можно определить по формуле

$$M = \lg \frac{a}{T} + f(\Delta, H) + C, \quad (2.23)$$

где a — амплитуда смещения почвы (в мкм) в поверхностных волнах, T — преобладающий период (в с), Δ — эпицентральный расстояние, измеряемое углом между радиусами, проведенными из центра Земли через очаг землетрясения и через сейсмическую станцию, h — глубина очага землетрясения. Функция $f(\Delta, h)$ является результатом обработки многочисленных записей и учитывает убывание амплитуды волны с расстоянием. Последний член C представляет собой «станционную» поправку, учитывающую условия установки регистрирующей аппаратуры. Функция $f(\Delta, h)$ приводит наблюдения к единому эпицентральному расстоянию, для которого можно уже непосредственно сравнивать амплитуды волн. Начало отсчета шкалы выбирается по достаточно малой стандартной амплитуде, которая считается соответствующей землетрясению с магнитудой, равной нулю. Самое сильное землетрясение — это Ассамское (1952 г.), его магнитуда 8,7. Современная аппаратура позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой до -2 , -3 с точностью $\pm 0,1$.

Существует зависимость между магнитудой и полной энергией землетрясения E . Величина $\frac{a}{T}$ служит мерой деформации грунта под действием сейсмической волны. Связь между E и M выражается эмпирической формулой

$$\lg E = A + BM. \quad (2.24)$$

Коэффициенты A и B определяются сравнением магнитуды с энергией сейсмических волн от землетрясений той же магнитуды. Такое определение A и B связано с тем, что энергия волны в единице объема горной породы пропорциональна квадрату

деформации. Если бы землетрясения разной магнитуды возбуждали цуги волн одинаковой формы, то коэффициент B был бы равен 2. На самом деле спектр и длина цуга волны зависят от магнитуды.

По Гутенбергу и Рихтеру уравнение (2.4) записывается так:

$$\lg E = 11,8 + 1,50M \quad (2.25)$$

или для объемных волн

$$\lg E = 6,5 + 2,3m, \quad (2.26)$$

где магнитуда объемных волн m равна $2,5 + 0,63M$.

Если подставить в (2.25) $M = 8,7$, то для самого сильного землетрясения получим $E = 5 \cdot 10^{24}$ эрг. Это громадная энергия, которая составляет 0,05% от полного количества тепла, теряемого за год всей Землей ($\sim 10^{28}$ эрг). Отсюда можно сделать вывод, что процессы, определяющие накопление такой большой энергии в очагах, должны определяться основными свойствами мантии, они не могут быть случайными.

Для сравнения укажем, что энергия, выделившаяся при взрыве атомной бомбы в Хиросиме, $\sim 10^{20}$ эрг. Однако, если взорвать все накопленные к настоящему времени ядерные заряды ($Q > 5 \cdot 10^{10}$ т), то это будет равносильно небывалому землетрясению с магнитудой больше чем 11,3:

$$M = 3,65 + \lg Q$$

(Q — заряд в килотоннах). Эта формула применима при расчетах подземных ядерных взрывов.

Если подсчитать энергию, выделяющуюся всеми землетрясениями за год, то мы увидим, что наибольшую энергию производит катастрофическое (одно!) землетрясение, остальные добавляют еще 15% от величины $5 \cdot 10^{24}$ эрг для $M = 8,7$.

Механизм очага землетрясения

Выяснение причин землетрясений и объяснение их механизма — одна из основных задач геофизики.

При сравнении результатов геодезической съемки, проведенной в Калифорнии до и после землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско, Рейд выдвинул теорию упругой отдачи при тектонических землетрясениях. Теория содержала пять основных положений.

1. Разрыв сплошных горных пород, вызывающий тектоническое землетрясение, наступает в результате накопления упругих деформаций выше предела, который может

- выдержать горная порода. Деформации возникают при относительных перемещениях соседних блоков земной коры.
2. Относительные перемещения блоков не происходят внезапно в момент разрыва, а нарастают постепенно в течение более или менее длительного времени.
 3. Движение в момент землетрясения состоит только лишь из упругой отдачи — резкого смещения сторон разрыва в положение, в котором отсутствуют упругие деформации. Это движение заметно на расстоянии в несколько миль от разрыва.
 4. Сейсмические волны возникают на поверхности разрыва. Площадь поверхности, с которой они излучаются, сначала очень мала, но затем быстро увеличивается и становится большой. Скорость ее распространения не превосходит V_p и V_s .
 5. Энергия, освобожденная во время землетрясений, до землетрясения была энергией упругой деформации горных пород.

Разрыв пород с сухим трением легче осуществляется при неглубоких землетрясениях. На глубинах, превышающих несколько километров, сдвиг и проскальзывание с сухим трением невозможны. Сдвиг происходит в присутствии жидкости (воды). Такое проскальзывание — важная особенность тектонических землетрясений. Яркий пример проскальзывания вдоль разломов наблюдался на поверхности во время землетрясения в Империял-Вэлли (Калифорния) в сентябре 1950 г.

Если на поверхности разлома не видно, то проскальзывание произошло в более глубоких частях коры.

Проскальзывание вдоль разрыва, выходящего на поверхность, аналогично смещениям в винтовых дислокациях, известных из физики твердого тела.

Некоторые ученые (Бриджмен и др.) подвергали сомнению теорию проскальзывания, они предполагали, что землетрясение определяется резким изменением объема в результате внезапного фазового перехода. Такой механизм, если он существует, более вероятен для глубокофокусных землетрясений.

Вулканы

Извержение вулканов — одно из самых эффектных и грозных явлений природы. В процессе извержения из глубинных недр Земли на поверхность выносятся расплавленная огненная

масса (магма). Наземные вулканы образуют огромное количество лав и вулканогенно-обломочного материала. Например, во время извержения вулкана Безымянного на Камчатке в 1956 г. выброшенный из жерла вулкана обломочный материал достиг объема в несколько кубических километров, а объем излившейся лавы составил несколько десятков кубических километров. При этом высота подъема газов, паров воды, насыщенных пеплом и обломками, лав достигала 45 км.

Еще больше масштабы подводного вулканизма. В пределах срединно-океанских хребтов ежегодно извергается базальтовых подводных лав приблизительно в три раза больше, чем у наземных вулканов. В соответствии с концепцией тектоники литосферных плит вся океанская земная кора (более $\frac{2}{3}$ всей поверхности Земли) сформировалась в результате глубоководного вулканизма за последние 150 млн лет.

Наземные извержения вулканов происходят практически на всех формах рельефа поверхности, сформировавшихся в результате самых различных геодинамических процессов. Это островные дуги (Курило-Камчатская, Японская, Филиппинская и другие островные дуги Тихого океана, острова Индонезийского архипелага, Малые Антильские острова), активные окраины континентов андийского типа (Анды, Кордильеры) и зоны сочленения континентов (Кавказ, Средиземноморье), рифтовые зоны континентов (Восточная Африка, Байкал) и участки аномального вулканизма («горячие точки») в пределах срединно-океанских хребтов (Исландия, Галапагос, о. Вознесения и др.). Это и зоны аномального внутриплиточного вулканизма (нагорья Ахаггар и Тибести в Африке) и районы пассивных окраин континентов (острова Зеленого Мыса, Камерун).

В зависимости от вязкости и газонасыщенности магмы наземные извержения отличаются исключительным разнообразием. При обычных для начала извержения температурах 1000–1200°C вязкость магматических расплавов разного состава (в зависимости от места извержения) может изменяться от 10^2 до 10^{10} пуаз. При этом по мере снижения температуры расплава его вязкость может возрастать на 3–4 порядка.

Существуют различные типы извержений вулканов в зависимости от величины вязкости расплавов.

Гавайский тип извержения, создающий чаще всего щитовидные вулканы, отличается относительно спокойным излиянием жидкой базальтовой магмы, образующий в кратерах огненно-

жидкие озера и лавовые потоки. Газы образуют фонтаны, выбрасывающие комки и капли жидкой лавы, которые вытягиваются в полете в тонкие стеклянные нити (вулкан Килауэа).

В стромболианском типе извержений, создающем обычно стратовулканы, наряду с излиянием жидких лав базальтового и андезитово-базальтового составов, преобладающими являются небольшие взрывы, которые выбрасывают куски шлака и витые и веретенообразные бомбы.

Для купольного типа извержений характерно выжимание и выталкивание вязкой (андезитовой, дацитовой или риолитовой) лавы сильным напором газа из каналов вулкана и образование куполов, криптокуполов, конусокуполов и обелисков.

В вулканическом типе большую роль играют газообразные вещества, производящие взрывы и выбросы огромных черных туч, переполненных большим количеством обломков лав.

Глубоководный вулканизм проявляется главным образом в осевых частях срединно-океанских хребтов и в зонах окраинных морей, где происходит излияние однообразных по составу расплавов толеитовых базальтов. В меньшей степени глубоководный вулканизм проявлен на трансформных разломах и в зонах аномального вулканизма (вулканы «горячих точек» типа Гавайского Императорского хребта).

На поверхности океана глубоководное извержение вулкана обычно никак не проявляется. Выделяющиеся из волнистых, подушечных, глыбовых расплавов вулканические газы полностью поглощаются водной толщей.

Процессы вулканизма, как уже отмечалось, играют большую роль в изменении облика Земли, формировании земной коры. Существенное влияние вулканизм оказывает на формирование атмосферы и гидросферы, на условия обитания живых организмов и человека. В районах, подверженных вулканизму, проживает более 400 млн человек. В настоящее время на суше известно более 800 вулканов, извергавшихся в историческое время.

Ежегодно на поверхности Земли происходит 20–30 извержений, из которых 1–2 приносят немалые разрушения существующим экосистемам. Упомянем несколько очень крупных катастрофических извержений вулканов.

Извержение крупного вулкана Индонезии Тамборы считается самым мощным извержением, произошедшим в историческое время. Оно длилось более года с апреля 1815 г. по июль 1816 г. Высота бывшей горы уменьшилась на 1500 м. Взрывом была образована кальдера (округлая впадина на месте вулканического конуса) диаметром 6 км и глубиной 500–600 м, при

этом перемещено почти на порядок больше горных пород, чем при извержении Кракатау. Извержение сопровождалось сильными землетрясениями, приливными волнами и ураганами. Были засыпаны метровым слоем пепла постройки, находящиеся на расстоянии от вулкана до 110 км. Погибло более 50 тыс. человек.

Крупнейшая катастрофа произошла при извержении вулкана Кракатау в Зондском проливе между островами Ява и Суматра. 26 августа 1883 г. началось извержение, которое можно было наблюдать с кораблей, проходивших вдалеке. На следующий день в 10 ч 20 мин гигантский взрыв разнес вдребезги вулканические конусы Данау и Перуватан. Грохот взрыва был слышен в Австралии (удаление 3 600 км) и даже на острове Родригес (5 000 км, Индийский океан). Тончайшая пыль достигла стратосферы, в которой она распространилась по всей Земле, вызвав во всех странах необычайно яркие закаты Солнца и сумерки. В Джакарте, напротив, пыль, попавшая в атмосферу, затмила солнце почти до полной темноты. Среднегодовая температура Земли в результате частичного экранирования солнечного излучения снизилась на несколько градусов. Чудовищный взрыв вызвал гигантскую волну (цунами) высотой до 40 м, которая обрушилась на города Марак, Аньер, Тьяринган и полностью их разрушила, погубив большую часть населения этих городов.

Вулкан Килауэа (о. Гавайи, США) в течение 10 лет, предшествовавших извержению, характеризовался повышенной сейсмической активностью, сопровождающейся плавными извержениями с накоплением лавы во впадинах на верхних этажах горы. 1 февраля 1994 г. в результате землетрясения с магнитудой 5,2 произошло обрушение отрезка побережья длиной 400 м и шириной 25 м, в результате чего потоки лавы устремились в море. Главный толчок сопровождался 300 повторными толчками. Почти непрерывное извержение Килауэа продолжается.

Исследование деятельности вулканов и их опасных проявлений может дать возможность предсказания характерных типов вулканической деятельности. Для прогноза извержений вулканов используются сейсмические и геомагнитные методы геофизических исследований. Эти методы оказались успешными при прогнозе извержений вулканов Михара (Япония), Руапеку и Нгаурукос (Новая Зеландия).

Цунами

При подводных землетрясениях на поверхности океана обычно возбуждаются очень длинные волны в результате резкого погружения или подъема океанского дна. Волны с большой

скоростью пересекают пространства океана и могут вызвать серьезные разрушения на побережье в тысячах километрах от очага землетрясения. Чаще всего цунами обрушиваются на берега Тихого океана, так как он опоясан кольцом очагов землетрясений с высокой сейсмической активностью. Во время Чилийского землетрясения 1960 г. возникли особенно сильные цунами, которые на всем Тихоокеанском побережье достигали высоты в несколько метров. Скорость распространения цунами равна

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \sqrt{gh},$$

где h — толщина захваченной волновым движением воды (глубина бассейна). Для океана глубиной 5 км скорость цунами составляет 790 км/ч, период — 10–40 мин, $\lambda \sim 100$ км и более. В океане эта волна незаметна, цунами можно определить только по показаниям гравиметров. По мере приближения к берегу длина волны уменьшается, нарастает высота гребней за счет утончения водного слоя при сохранении в основном волновой энергии. Волна может фокусироваться на отдельных участках при подходе к берегу. В бухтах и расширенных устьях рек могут возникнуть собственные колебания уровня воды (сейши). 95% цунами вызываются землетрясениями и только 5% — вулканическими извержениями, обвалами и пр. Но именно цунами от сильных вулканических извержений являются наиболее мощными (Санторин, Кракатау, Риттер-Сакар и др.).

Микросейсмы

Кроме волн от землетрясений сейсмографы записывают более или менее непрерывный фон, преобладающие периоды которого обычно составляют от 5 до 10 с, а амплитуды иногда достигают 10 мкм. Такие колебания называются микросейсмами.

Микросейсмы возбуждаются разными источниками. Большой интерес представляют микросейсмы, возбуждаемые штормами в океане, береговыми приboями. Существует связь между циклонами на океанах и большой интенсивностью микросейсм. Сверхдлиннопериодные микросейсмы вызываются, по современным представлениям, вариациями атмосферного давления.

В экологическом аспекте такие геофизические явления как цунами, землетрясения, вулканизм, сейсмичность и др. будут рассмотрены в гл. 22.

Глава 3

Тепловой режим и возраст Земли

Основные источники тепла Земли

Нам известны температура поверхности Земли и тепловой поток из земных недр, наблюдаемый на поверхности. Эти данные можно интерпретировать различным образом, поэтому здесь много неопределенности. Для глубины более 100 км наши знания о распределении температуры весьма ненадежны, а расположение источников тепла и механизмы его переноса неизвестны. Однако изучение теплового режима Земли очень важно, поскольку тепловая энергия прямо или косвенно является причиной большей части тектонических и магматических процессов, метаморфизма и генерации магнитного поля Земли.

Как видно из табл. 3.1, самое большое количество энергии Земля получает от Солнца, но значительная ее часть излучается обратно, в пространство. Лишь малая доля солнечной энергии проникает внутрь Земли на глубину, превышающую 30–40 м, где температура остается постоянной. Начиная именно с этих глубин в шахтах производятся измерения теплового потока, плотность q

Таблица 3.1. Основные составляющие энергетического баланса Земли

Источник энергии	Величина энергии, эрг/год
солнечная энергия	10^{32}
геотермическая энергия	10^{28}
упругая энергия землетрясений	10^{25}
энергия, теряемая при замедлении Земли (за счет неупругости при приливном взаимодействии Земля–Луна)	$3 \cdot 10^{26}$
тепло, выносимое при извержении вулканов	$2,5 \cdot 10^{25}$

которого определяется по формуле

$$q = -\lambda \text{ grad } T, \quad (3.1)$$

где λ — теплопроводность горных пород, $\text{grad } T$ — геотермический градиент, противоположный направлению q .

В дие океанов измерения проводятся на меньших глубинах (несколько метров) в толще осадочных пород, так как дно от влияния солнечной энергии защищает толстый слой океанской воды. Полную энергию можно выразить как

$$E = qSt,$$

где S — площадь поверхности Земли, t — время (годы).

Современные методы определения возраста Земли

Проблема теплового потока, а одновременно и возраста Земли нашла свое научное решение с открытием радиоактивности (Беккерель). Первую оценку возраста Земли провел Эрнест Резерфорд в 1905 г. на основе открытого им закона радиоактивности. Полученное им число — 500 млн лет — намного превосходило предполагавшиеся в то время максимальные геологические возрасты.

В 1905 г. Стретт (Рэлей) установил неоднородное распределение радиоактивных источников в Земле. Оказалось, что концентрация радиоактивности в магматических горных породах намного превосходит ту величину, которую должна иметь Земля для объяснения наблюдаемого теплового потока. Он предположил, что радиоактивные элементы находятся только в земной коре. Это сразу сняло проблему теплопроводности, которая привела Кельвина к ошибочному выводу.

Рэлей установил, что основные магматические породы (базальт, габбро) беднее радионуклидами, чем более легкие кислые гранитные породы. Этот факт служит основой теории формирования земной коры из вещества мантии и теории распределения температуры внутри Земли.

Концентрация тяжелых радиоактивных изотопов в верхних слоях Земли объясняется тем, что они формировались позже остальных и имели большие объемы. В силу последнего они выталкивались из плотноупакованных кристаллических решеток силикатов и вместе с более легкой фракцией всплывали наверх.

Измерения возраста горных пород, минералов и метеоритов, а тем самым и Земли, основаны на естественном радиоактивном распаде U^{238} , U^{235} , Rb^{87} , K^{40} .

Процесс радиоактивного распада описывается через вероятность преодоления потенциального барьера частицами атомного ядра. Энергии их так велики, а размеры ядра так малы, что обычные *РТ*-условия не влияют на вероятность распада ядра.

Скорость распада N ядер определенного сорта пропорциональна их числу:

$$\frac{dN}{dt} = -kN, \quad (3.2)$$

где k — постоянная распада. Если начальное число ядер N_0 , то интегрирование дает основное уравнение

$$N = N_0 e^{-kt}. \quad (3.3)$$

Период полураспада $T_{1/2}$ получается подстановкой в (3.3) $N = \frac{N_0}{2}$ и $t = T_{1/2}$:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,69315}{k}. \quad (3.4)$$

Начальная концентрация N_0 изотопа, как правило, неизвестна. Обычно измеряется концентрация D дочернего изотопа. Тогда

$$D = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-kt}). \quad (3.5)$$

Поделив (3.5) на (3.3), получим уравнение без N_0 :

$$D = N (e^{kt} - 1). \quad (3.6)$$

По известным D и N определяется возраст t .

Возраст Земли нельзя определить, не обращаясь к метеоритам. Очевидно, что возраст Земли больше, чем возраст самых древних пород, для которых он равен $\sim 3 \cdot 10^9$ лет. Геологические данные ничего не дают для первых миллиардов лет существования Земли. Это связано с тем, что тогда выделение тепла было намного больше, чем теперь. Земная кора еще не выделилась и радиоактивные элементы в среднем располагались глубже. Магматическая активность была очень высокой, и образовавшиеся горные породы вновь подвергались расплавлению и переработке.

Предполагается, что первичная дифференциация вещества на Земле и вещества метеоритов была одинаковой, так как формирование всей планетной системы происходило одновременно и по общим законам. Проведенные многочисленные измерения в железных метеоритах дали возможность определить изотопный

состав первичного свинца. Содержащиеся в каменных метеоритах U и Th при распаде образуют изотопы радиогенного свинца. По отношению радиогенного свинца к первичному определяется возраст Земли ($\sim 4,6 \cdot 10^9$ лет).

Температура в недрах Земли

Тепловой поток является произведением теплопроводности горных пород на градиент температуры (уравнение (3.1)). Все измерения показывают, что геотермический градиент направлен в глубь Земли, что означает повышение температуры с глубиной. Среднее значение геотермического градиента около $20^\circ\text{C}/\text{км}$. Однако наблюдаются значительные отклонения от этого значения в различных областях земной поверхности. Различные значения теплового потока коррелируют с различными геологическими структурами.

Температуру в недрах Земли можно оценить из следующих соображений. Поскольку $\text{grad } T$ не возрастает с глубиной, то на глубинах $l \approx 100$ км T не более 2000°C . Более точно T на этих глубинах можно определить по температуре очагов вулканов, находящихся на этих глубинах, которая составляет приблизительно 1200°C . На глубинах 400 км происходят фазовые переходы минералов $\text{MgSiO}_3\text{--Fe}_2\text{SiO}_2$, температура которых равна $1600 \pm 50^\circ\text{C}$.

Мантия Земли по отношению к сейсмическим волнам ведет себя как твердое тело, поэтому за верхний предел температур принимается распределение температур около кривой плавления, зависящей от давления. Лабораторные данные по зависимости $T_{\text{пл}}$ силикатов, составляющих мантию, от давления дают T на границе ядро мантия порядка $5 \cdot 10^3$ К ($P = 1,4106$ бар).

Земное ядро находится в расплавленном виде и состоит в основном из железа. $T_{\text{пл}}$ железа при $P = 1,4106$ бар не более 4600 К. В жидком ядре градиент температуры не может быть выше адиабатического, так как иначе начнется конвекция, которая выравнит температуру. Исходя из этого T в центре ядра оценивают $\sim 6 \cdot 10^3$ К. Такой метод оценки распределения T в Земле называется методом реперных точек.

Механизмы переноса тепла в Земле

Теплопроводность. Если считать, что перенос тепла осуществляется только за счет теплопроводности, то в силу большой инерционности этого механизма следует предположить, что

основная масса (80–90%) источников тепла сосредоточена в наружном 100-километровом слое горных пород, что представляется маловероятным. Поэтому очевидно наличие и других механизмов переноса тепла в недрах Земли.

Перенос тепла лучеиспусканием и экситонами. При температурах выше 800–1500 °C значительное количество тепла передается через породу лучеиспусканием. При более высоких температурах можно ожидать преобладания лучистого переноса. Эффективность этого переноса определяется прозрачностью силикатных минералов к красным и инфракрасным лучам. Добавка коэффициента k_r лучистого переноса к теплопроводности выражается приблизительно так:

$$k_r = \frac{16n^2 s T^3}{3e}, \quad (3.7)$$

где n — показатель преломления, s — постоянная Стефана-Больцмана, e — коэффициент непрозрачности. Непрозрачность может препятствовать лучистому переносу, она зависит от количества свободных электронов.

Другой механизм заключается в переносе тепла экситонами. Нейтральные атомы могут возбуждаться радиацией, энергия которой недостаточна для образования свободных электронов, при передаче энергии возбуждения соседнему атому происходит и передача тепла. В некоторых областях мантии экситонная теплопередача ($l > 100$ км) может быть интенсивнее лучистого переноса.

Тепловая конвекция. В жидкой среде она может вынести большое количество тепла даже при сравнительно небольшом градиенте. По-видимому, именно конвекцией передается тепло вверх через внешнее ядро. Многие данные, связанные с происхождением основных поверхностных структур, свидетельствуют о существовании конвекции в мантии. Вязкость верхней мантии может быть достаточно малой, чтобы допустить конвекцию при сравнительно небольшом температурном градиенте, превышающем адиабатический.

Важная геотермическая роль конвекции состоит в том, что тепло из недр Земли может быть вынесено к поверхности Земли гораздо быстрее, чем посредством теплопроводности. Гипотеза конвекции в верхней мантии объясняет уменьшение геотермического градиента глубже 50–100 км от поверхности.

Глава 4

Геомагнетизм

Магнитные поля широко распространены во Вселенной. Имеют магнитное поле Солнце, звезды, облака плазмы, перемещающиеся в космическом пространстве. Они, как правило, «замагничены», силовые линии поля «вморожены» в плазму. Магнитные поля обнаружены у всех планет, кроме Плутона (пока неизвестно), и у Луны (табл. 4.1).

Магнитное поле Земли играет исключительную роль в жизни нашей планеты: оно регулирует в основном солнечно-земные взаимодействия, его силовые линии защищают поверхность Земли от проникновения от Солнца и из Космоса частиц высокой энергии, оно пронизывает всю земную твердь, океан и атмосферу, оказывает большое влияние на живую и неживую природу, намагничивает горные породы и почвы, оказывает большое влияние на плодородие последних. Чрезвычайно важную роль магнитное поле сыграло в развитии человеческой цивилизации: с начала развития мореплавания оно служило уникальным ориентиром для моряков и в наши дни продолжает оставаться ориентиром морской, воздушной, подводной и спутниковой навигации. Именно с развитием мореплавания связано становление геомагнетизма как науки, отсчет развития которой ведется с открытия Х. Колумбом магнитного склонения во время его знаменитого путешествия к берегам Америки в сентябре 1492 г. Как известно, наука возникает тогда, когда начинаются измерения, — после открытия Колумба начались многочисленные измерения склонения геомагнитного поля сначала на морях и океанах, а затем и на континентах.

Предметом геомагнетизма является установление и теоретическое объяснение особенностей структуры и динамики геомагнитного поля, а также их использование для познания внутреннего строения Земли и ее верхней атмосферы (магнитосферы). Жидкое металлическое ядро, твердые мантия и кора, а также верхняя атмосфера вносят свой вклад в геомагнитное поле или оказывают на него влияние. Поэтому данные о геомагнитном

Таблица 4.1. Основные параметры магнитного поля Луны и планет

Небесное тело	Радиус ядра, км	B , нТл	M , Ам ²	Наклон магнитной оси к оси вращения, градусы	Магнитный полюс, расположенный в Северном полушарии
Меркурий	1 800	350	$5 \cdot 10^{19}$	10–20	N
Венера	3 000	3	$7 \cdot 10^{20}$		
Земля	3 460	50 000	$8 \cdot 10^{22}$	11,5	S
Луна	350	1	$5 \cdot 10^{17}$		
Марс	1 500	30 60	$2 \cdot 10^{19}$	12	S
Юпитер	54 000	$420 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^{27}$	9,5	N
Сатурн	27 000	$20 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{25}$	1	N
Уран	Проводящие оболочки на расстоянии 0,55 км от центра	$13 \cdot 10^3$	—	59	—
Нептун		$6,5 \cdot 10^3$		47	
Плутон	—	—	—	—	—

поле, в свою очередь, несут ту или иную информацию об этих областях Земли. Так, например, предположение о наличии проводящей ионосферы было сделано на основании изучения суточных вариаций геомагнитного поля. Магнитные бури несут информацию о сложных взаимодействиях верхней атмосферы Земли с корпускулярным излучением Солнца (солнечным ветром).

Намагниченные горные породы обладают свойством «магнитной памяти» о древнем геомагнитном поле, в котором они намагнитились. Поэтому тщательное «палеомагнитное» изучение истории геомагнитного поля позволяет получать ценную информацию о строении и эволюции Земли. В частности, это дало возможность выдвинуть гипотезу о конвективных движениях жидкого ядра, основанную на факте существования поля и его длиннопериодных (вековых) вариаций, разработать концепцию спрединга океанского дна, базирующуюся на структуре линейных океанских геомагнитных аномалий и палеомагнитохронологической шкале геомагнитных инверсий. В результате изучения индуцированных полей были открыты аномалии электропроводности в литосфере.

Геомагнетизм находит широкое применение при решении многих практических задач. При разведке полезных ископаемых магнитными методами определяются геомагнитные аномалии, обусловленные залежами железных руд и других полезных ископаемых. Для решения поисковых задач используется также тонкая структура чередования направления намагниченности горных пород, связанная с инверсиями геомагнитного поля, и зависимость между временными вариациями магнитного и электрического полей.

Элементы геомагнитного поля

Магнитное поле в какой-либо точке O земной поверхности с координатами φ (географическая широта) и λ (долгота) характеризуется магнитной индукцией B (рис. 4.1). Введем в точку O прямоугольную систему координат, в которой x направляется на географический север, y — на восток, z — вертикально вниз. В Северном полушарии Земли вектор геомагнитной индукции B направлен вниз от горизонтальной плоскости x, y . Его проекции на соответствующие оси называются северной (X), восточной (Y) и вертикальной (Z) составляющими геомагнитного поля. Проекция B на горизонтальную плоскость x, y называется горизонтальной составляющей и обозначается через H . Горизонтальная составляющая в отличие от X, Y, Z является вектором, так как она определяется

не только абсолютной величиной, но и направлением на плоскости x, y . Если Ox — направление географического меридиана в точке O , то OH — направление геомагнитного меридиана, в общем случае не совпадающее с направлением географического. Угол D между геомагнитным и географическим меридианами называется углом магнитного склонения, угол J между горизонтальной плоскостью и направлением B — углом магнитного наклона. D, J принято называть угловыми, а X, Y, Z, H — силовыми элементами поля (или земного магнетизма). Различные комбинации вышеперечисленных элементов полностью определяют вектор B : X, Y, Z в прямоугольной системе координат, Z, H, D — в цилиндрической и $|B|, D, J$ в сферической системе.

Между элементами существуют простые соотношения:

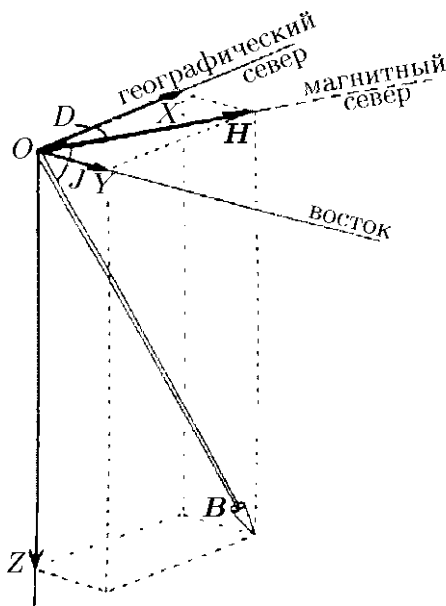


Рис. 4.1. Схема определения геомагнитной индукции B в некоторой точке O с географическими координатами (φ, λ) . Проекции H, X, Y, Z и углы D (магнитное склонение) и J (магнитное наклонение) — элементы геомагнитного поля

$$B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad \operatorname{tg} D = \frac{Y}{X}, \quad (4.1)$$

$$\operatorname{tg} J = \frac{Z}{H} = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}, \quad B = \frac{X}{\cos D \cos J}$$

и т. п.

В связи с тем, что склонение D есть угол между направлениями на географический и магнитный север, для его измерения необходимо определять направление на географический север с помощью астрономических наблюдений, обычно по положению Солнца или полярных звезд. Магнитное склонение считается положительным при отсчете угла D на восток и отрицательным

при отсчете на запад. На магнитных картах элементы геомагнитного поля представляются в виде линий равных значений (изолиний). Изолинии склонения D называются изогонами, изолинии наклонения J — изоклинами, изолинии X , Y , Z и H — изодинамами соответствующих элементов. Величины Z , J положительны в северном полушарии.

Индукция B геомагнитного поля имеет различные величины и направление в разных точках земной поверхности. Минимальные значения B наблюдаются на геомагнитном экваторе, который определяется условием $J = 0$. Максимального значения B достигает на магнитных полюсах, на которых $J = \frac{\pi}{2}$. Магнитные полюсы и магнитный экватор не совпадают с географическими полюсами и географическим экватором соответственно. Средняя геомагнитная индукция в системе единиц СИ составляет около 50 000 нТл, на магнитном экваторе $B \approx 35\,000$ нТл, на магнитных полюсах $B \approx 65\,000$ нТл. Геомагнитное поле принято также характеризовать его напряженностью.

Наблюдения элементов геомагнитного поля, производящиеся в различных точках земной поверхности, показывают, что они не остаются постоянными во времени, а непрерывно изменяют свои значения. Эти изменения называются вариациями элементов геомагнитного поля. Периоды вариаций изменяются от долей секунды до нескольких месяцев. Кроме того существуют вариации и среднегодовых значений элементов. Поэтому вариации в зависимости от их периода можно разделить на два принципиально различных типа: быстротечные периодического характера и медленные вариации среднегодовых значений элементов геомагнитного поля. Последние называются вековыми ввиду большой длительности их периодов.

Исследования обоих типов вариаций показали, что они различаются не только по величинам их периодов, но и по происхождению. Источники быстротечных вариаций находятся в верхних слоях атмосферы — это токовые системы и системы взаимодействия корпускулярного излучения Солнца (солнечного ветра) с силовыми линиями геомагнитного поля в околоземном пространстве. Источники вековых вариаций расположены в ядре Земли, там же, где генерируется основное, или главное, геомагнитное поле.

Помимо главного геомагнитного поля и его вековых вариаций, а также поля быстротечных вариаций (электромагнитного

поля) существует еще поле, создаваемое намагниченными горными породами, расположенными в земной коре. Это поле называется аномальным геомагнитным полем. Таким образом, наблюдаемое на поверхности Земли геомагнитное поле является суммой трех полей, источники которых имеют различные физические механизмы происхождения и различное месторасположение.

1. Главное геомагнитное поле и его вековые вариации (источники расположены в ядре Земли).
2. Аномальное геомагнитное поле (источники расположены в земной коре).
3. Электромагнитное поле (внешнее поле, источники расположены в околоземном пространстве).

Вклад главного поля в поле, наблюдаемое на поверхности Земли, составляет более 95%, аномальное поле вносит около 4% и внешнее поле — менее 1%.

Исследования геомагнитного поля

Исследования геомагнитного поля начинаются с непосредственных наблюдений пространственного распределения поля и его временных изменений (вариаций) на поверхности Земли, в атмосфере и в околоземном пространстве. Наблюдения заключаются в измерениях элементов или модуля геомагнитного поля в различных точках и носят название магнитных съемок. Съемки подразделяются на наземные, морские (гидромагнитные), воздушные (аэромагнитные) и спутниковые. Они различаются методикой проведения и требуют специальной аппаратуры.

Геомагнитное поле имеет очень сложное распределение по поверхности Земли, однако проблема установления закономерностей этого распределения значительно усложняется тем, что поле изменяется с течением времени и эти изменения (вековые вариации) имеют различный характер в разных точках земного шара. Добавим для полноты картины еще и то, что скорость изменения поля $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ (t берется в годах), называемая вековым ходом, также не остается постоянной во времени.

Таким образом, магнитные съемки поверхности Земли и отдельных регионов должны проводиться практически непрерывно, по крайней мере до тех пор, пока не будут установлены аналитические зависимости вековых вариаций от времени для разных точек земной поверхности. Последняя задача, имеющая

фундаментальное значение для земного магнетизма, еще очень далека от своего решения.

Полученные в результате магнитных съемок данные о распределении поля представляются в виде магнитных карт и каталогов. При построении магнитных карт, как уже отмечалось, применяется метод изолиний, т. е. кривых, соединяющих на карте точки с одинаковыми значениями соответствующего элемента или модуля геомагнитного поля.

В связи с временными изменениями поля составление магнитных карт приурочивается к середине какого-либо года (к 00 ч. 00 мин. 1 июля) и этот момент называется эпохой. Например, карта, составленная для 00 ч. 00 мин. 1 июля 1970 г., называется магнитной картой для эпохи 1970 года.

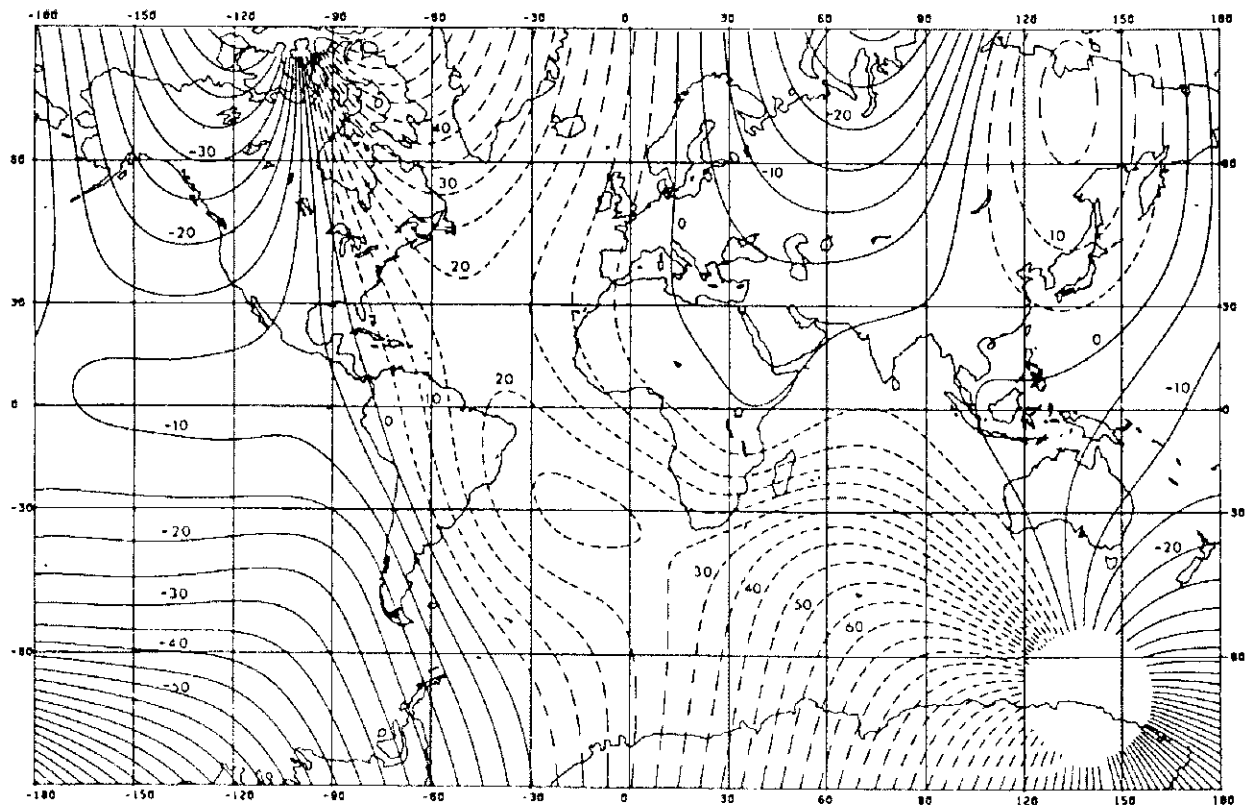
Магнитные карты строятся для ограниченной территории, региона, целой страны и всего земного шара. В последнем случае они называются мировыми картами. Чем меньше масштаб карт, тем менее точно передаются на картах особенности действительного распределения магнитного поля. Мировые карты следует рассматривать как картины некоторого среднего распределения элементов геомагнитного поля (рис. 4.2–4.4).

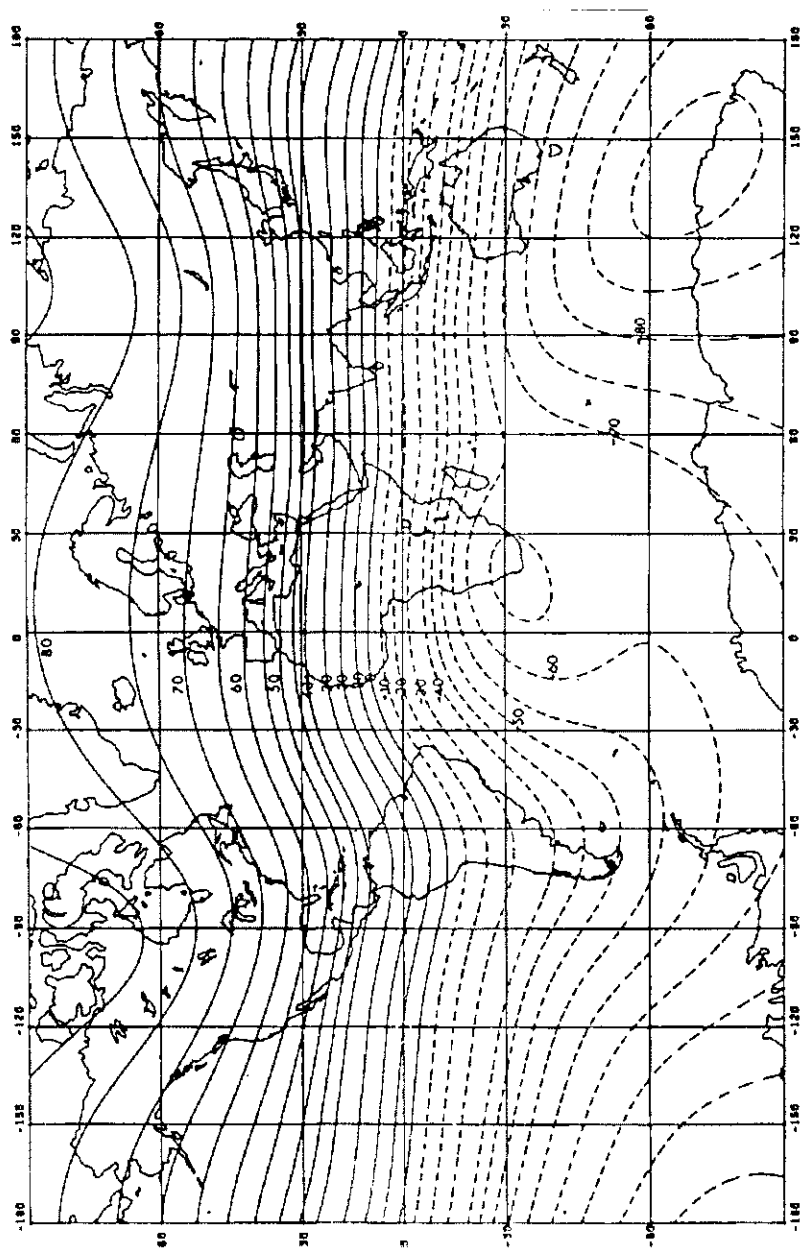
После того, как установлено (в каком-то приближении, разумеется) распределение геомагнитного поля, следующей задачей исследования является установление аналитической зависимости элементов поля от координат точек земной поверхности. Это может быть сделано при известных механизмах генерации поля или закономерностях его распределения.

Поле магнитного диполя

Первым принципиальные соображения о происхождении геомагнитного поля высказал в 1600 г. У. Гильберт в книге «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле». Он предположил, что геомагнитное поле возникает вследствие того, что земной шар намагничен. Ранее считалось, что магнитная стрелка компаса притягивается Полярной звездой. Гильберт экспериментально исследовал строение силовых линий у однородно намагниченного железного шара. В первом приближении оно соответствовало распределению силовых линий геомагнитного поля. Только после работ У. Гильберта ученые стали искать причины происхождения магнитного поля в особенностях строения земного шара.

Первую попытку аналитического представления зависимости геомагнитного поля от географических координат предпринял профессор Казанского университета И. М. Симонов в 1835 г. Он

Рис. 4.2. Мировая магнитная карта склонения D

Рис. 4.3. Мировая магнитная карта наклонения J

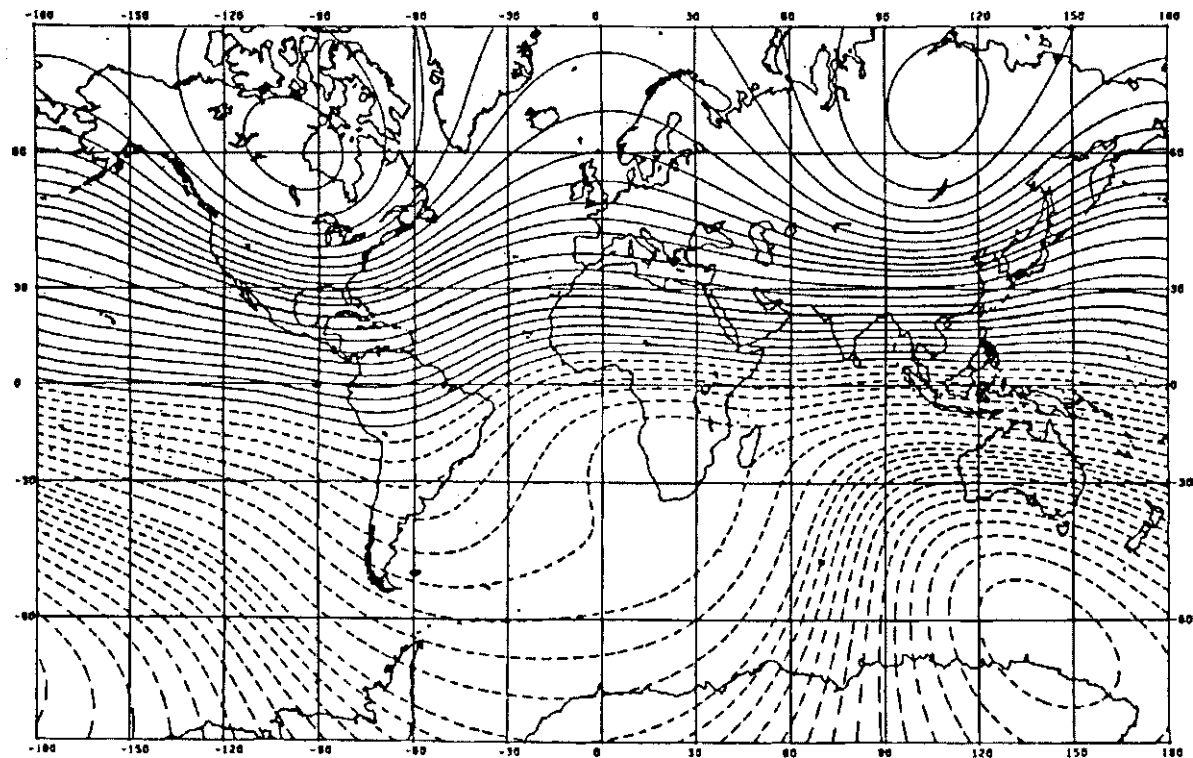


Рис. 4.4. Мировая карта вертикальной составляющей Z для эпохи 1985 г. Сплошные линии — положительные величины Z и $Z = 0$ (линия, граничащая со штриховой). Штриховые линии — отрицательные величины Z . Интервалы между изолиниями равны 4000 нТл для $Z \leq \pm 40\,000$ нТл и 2000 нТл для $Z > \pm 40\,000$ нТл (по Jacobs)

использовал идею У. Гильберта о намагниченном шаре. Однородно намагниченный шар создает вокруг себя распределение магнитного поля, аналогичное полю магнитного диполя. Магнитным диполем по аналогии с электрическим называется система двух очень близко расположенных фиктивных магнитных зарядов.

В связи с тем, что вековые изменения поля происходят сравнительно медленно (периоды вековых вариаций составляют сотни и тысячи лет), в первом приближении геомагнитное поле можно считать стационарным и для его описания использовать соответствующие уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned}\operatorname{rot} \mathbf{H} &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{I}),\end{aligned}\quad (4.2)$$

где $\mathbf{H}$ — напряженность, $\mathbf{B}$ — индукция магнитного поля, $\mathbf{I}$ — намагниченность (магнитный момент единицы объема вещества), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ Гн $\cdot$ м $^{-1}$. Согласно первому уравнению, учитывая,

что $\operatorname{rot} \operatorname{grad} = 0$, можно следующим образом выразить $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H} = -\operatorname{grad} U, \quad (4.3)$$

где U — скалярная функция, называемая магнитным потенциалом.

Итак, чтобы найти $\mathbf{H}$, надо знать выражение для магнитного потенциала. Магнитный потенциал диполя

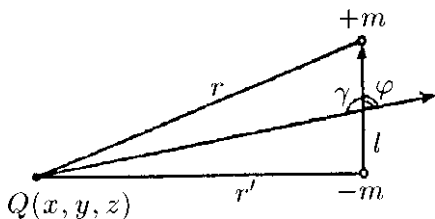


Рис. 4.5. Схема магнитного диполя: $+m$ и $-m$ — фиктивные магнитные заряды, l — расстояние между ними

(рис. 4.5) в точке $Q(x, y, z)$ равен

$$U(Q) = m \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right). \quad (4.4)$$

Разложим это выражение в ряд Тейлора по r' и ограничимся двумя членами, учитывая, что $l \ll r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r'} + l_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \right) + l_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{r} \right) + l_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) + \dots \quad (4.5)$$

Подставим (4.5) в (4.4) и учтем, что

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{x}{r^3} = -\frac{\cos(x, r)}{r^2},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{\cos(y, r)}{r^2},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{\cos(z, r)}{r^2}.$$

Так как магнитный момент $M = mI$, окончательно получаем

$$U(Q) = -\frac{M}{r^2} \cos \varphi = \frac{M}{r^2} \cos \gamma. \quad (4.6)$$

Предположим, что в центре Земли под углом к оси вращения расположен магнитный диполь (рис. 4.6). Точка P с координатами φ_0, λ_0 геомагнитный полюс, N географический полюс, $Q(\varphi, \lambda)$ точка, в которой мы ищем выражение для U и, соответственно, для элементов геомагнитного поля. Для того чтобы рассматривать модель Земли в сферической системе

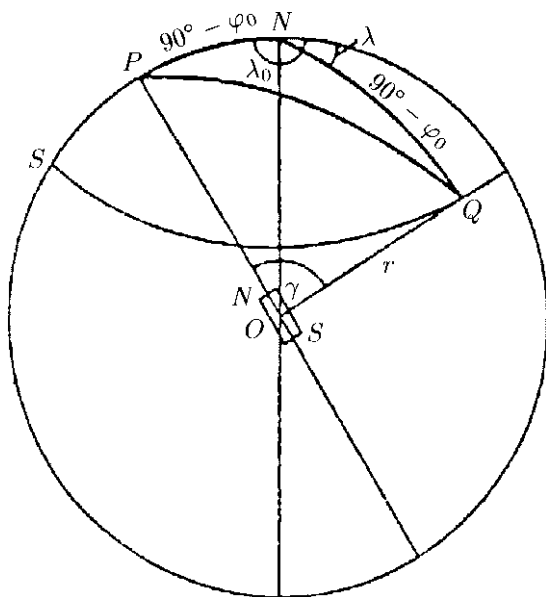


Рис. 4.6. Схема земного магнитного диполя (по [162])

координат, введем угол $\Theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$, который является дополнением до географической широты. Тогда длина дуги $NQ = \Theta$, длина $NP = \Theta_0$, длина дуги $PQ = \gamma$.

Согласно теореме косинусов сферической тригонометрии,

$$\cos \gamma = \cos \Theta \cos \Theta_0 + \sin \Theta \sin \Theta_0 \cos(\lambda - \lambda_0).$$

С учетом этого запишем выражение для магнитного потенциала земного диполя:

$$U = \frac{M}{r^2} \cos \gamma = \frac{M}{r^2} (\cos \Theta \cos \Theta_0 + \sin \Theta \sin \Theta_0 \cos \lambda \cos \lambda_0 + \sin \Theta \sin \Theta_0 \sin \lambda \sin \lambda_0). \quad (4.7)$$

Учтем, что

$$M = IV = \frac{4}{3} \pi R^3 I,$$

где I — однородная намагниченность земного шара, R — его радиус. Введем обозначения:

$$\begin{aligned} g_1^0 &= \frac{4}{3} \pi I \cos \Theta_0, \\ g_1' &= \frac{4}{3} \pi I \sin \Theta_0 \cos \lambda_0, \\ h_1' &= \frac{4}{3} \pi I \sin \Theta_0 \sin \lambda_0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Очевидно, что g_1^0, g_1', h_1' являются постоянными величинами для данного расположения диполя. Окончательно выражение для U сферической Земли будет таким:

$$U = \frac{R^3}{r^2} [g_1^0 \cos \Theta + (g_1' \cos \lambda + h_1' \sin \lambda) \sin \Theta]. \quad (4.9)$$

Далее в соответствии с (4.3) получим значения элементов геомагнитного поля на поверхности Земли ($r = R$). Дифференцирование производится в сферической системе координат:

$$\begin{aligned} X &= -\frac{\partial U}{r \partial \Theta} = [g_1^0 \sin \Theta - (g_1' \cos \lambda + h_1' \sin \lambda) \cos \Theta], \\ Y &= -\frac{\partial U}{r \sin \Theta \partial \lambda} = g_1' \sin \lambda - h_1' \cos \lambda, \\ Z &= -\frac{\partial U}{\partial r} = 2 [g_1^0 \cos \Theta + (g_1' \cos \lambda + h_1' \sin \lambda) \sin \Theta]. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Система (4.10) — основные уравнения теории Симонова, которые представляют аналитические зависимости геомагнитного поля от координат поверхностных точек.

Естественно, что расположение реального земного диполя нам неизвестно, поэтому неизвестны и значения коэффициентов g_1^0 , g_1' , h_1' . Однако эти коэффициенты могут быть рассчитаны из уравнений (4.10), если известны из измерений X , Y , Z и координаты точек, в которых производились измерения. А зная значения g_1^0 , g_1' , h_1' , можно рассчитать поле в любой точке земной поверхности.

Более простая модель геомагнитного поля получается в случае, если ось диполя совпадает с осью вращения Земли. При этом геомагнитный полюс совпадает с географическим, поэтому $\varphi_0 = -\frac{\pi}{2}$, а $\Theta_0 = 0$. Согласно уравнениям (4.8) и (4.10), получаем следующие значения элементов поля для осесимметричного диполя:

$$\begin{aligned} X &= g_1^0 \sin \Theta = \frac{M}{R^3} \cos \varphi, \\ Y &= 0, \\ Z &= 2g_1^0 \cos \Theta = \frac{M}{R^3} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Магнитное склонение D в этом случае равно нулю, а магнитное наклонение J имеет простую связь с географической широтой:

$$\operatorname{tg} J = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} = 2 \operatorname{tg} \varphi. \quad (4.12)$$

Теория геомагнетизма Гаусса

В 1838 г. К. Гауссом была создана общая теория аналитического представления геомагнитного поля как функции координат точек земной поверхности. Теория Гаусса не ограничивалась какой-либо конкретной моделью поля, как это имело место в теории Симонова. В основе теории Гаусса было только предположение о том, что источники геомагнитного поля находятся внутри земного шара и имеют потенциальный характер, т. е. $\mathbf{H} = -\operatorname{grad} U$.

Рассмотрим уравнения (4.2). Подставив во второе уравнение выражение для $\mathbf{B}$ с учетом того, что $\mathbf{H} = -\operatorname{grad} U$, получим

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = -\mu_0 \operatorname{div} \operatorname{grad} U + \mu_0 \operatorname{div} \mathbf{I} = 0. \quad (4.13)$$

Положим, что $\operatorname{div} \mathbf{I}$ равна некоторой плотности фиктивных магнитных зарядов ρ . Тогда из (4.13) получаем уравнение Пуассона

$$\nabla^2 U = \rho(x, y, z). \quad (4.14)$$

При $\rho = 0$ (отсутствие магнитных зарядов) оно переходит в уравнение Лапласа

$$\nabla^2 U = 0. \quad (4.15)$$

Считая, что земной шар обладает намагниченностью $\mathbf{I}$ с произвольным распределением ее величины и направления, и используя решения уравнений (4.14) и (4.15) в сферической системе координат ρ, Θ, λ , Гаусс получил следующее выражение для магнитного потенциала:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{R^{n+2}}{r^{n+1}} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \Theta), \quad (4.16)$$

где R — радиус Земли, g_n^m, h_n^m — постоянные коэффициенты:

$$g_n^m = \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{c_n}{R^{n+2}} \iiint r'^n P_n^m(\cos \Theta') \cos m\lambda' dm, \quad (4.17)$$

$$h_n^m = \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{c_n}{R^{n+2}} \iiint r'^n P_n^m(\cos \Theta') \sin m\lambda' dm. \quad (4.18)$$

В этих уравнениях r', Θ', λ' — сферические координаты для магнитных масс, находящихся внутри земного шара, dm — дифференциал этих масс. Так как распределение магнитных масс нам неизвестно, но оно, естественно, постоянно, то g_n^m, h_n^m суть постоянные коэффициенты, которые определяются, как это будет показано ниже, на основе измерений элементов геомагнитного поля.

Далее в (4.17) и (4.18) $c_n = 1$ при $m = 0$ и $c_n = 2$ при $m > 0$, $P_n^m(\cos \Theta)$ и $P_n^m(\cos \Theta')$ в (4.16)–(4.18) — присоединенные функции Лежандра:

$$P_n^m(\cos \Theta) = (\sin^2 \Theta)^{m/2} \frac{d^m P_n(\cos \Theta)}{d(\cos \Theta)^m}, \quad (4.19)$$

где, в свою очередь, $P_n(\cos \Theta)$ — полиномы Лежандра:

$$P_n(\cos \Theta) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d(\cos \Theta)^n} (\cos^2 \Theta - 1)^n. \quad (4.20)$$

Дифференцируя (4.16) по соответствующим сферическим координатам, получим выражения для элементов геомагнитного

поля, которыми и исчерпывается теория Гаусса. После дифференцирования положим $r = R$ и найдем значения элементов на поверхности Земли:

$$\begin{aligned}
 X &= -\frac{\partial U}{r \partial \Theta} = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \Theta)}{d\theta}, \\
 Y &= -\frac{\partial U}{r \sin \Theta \partial \lambda} = \\
 &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (mg_n^m \sin m\lambda - mh_n^m \cos m\lambda) \frac{P_n^m(\cos \Theta)}{\sin \theta}, \quad (4.21) \\
 Z &= -\frac{\partial U}{\partial r} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1)(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \Theta).
 \end{aligned}$$

Это разложение магнитного потенциала в бесконечный ряд по сферическим функциям, каковыми являются функции Лежандра, получило название сферического гармонического анализа. Уравнения (4.21) позволяют вычислить значения X, Y, Z для любой точки земной поверхности, если известны g_n^m и h_n^m , которые могут быть рассчитаны на основе измерений X, Y, Z в ограниченном числе точек. Для практического пользования (4.21) необходимо ограничиться конечным числом n членов. При этом число N постоянных коэффициентов g и h будет равно $N = n(n+2)$. Для расчета N коэффициентов необходимо иметь N уравнений, т. е. иметь измеренные значения трех компонент поля в $\frac{N}{3}$ точках или значения одной компоненты в N точках.

Случайные влияния местных аномалий или погрешности измерений могут исказить результат, поэтому для большей достоверности необходимо брать число уравнений (и число измерений), превышающее число неизвестных. Гаусс, ограничиваясь членами четвертого порядка ($n = 4$), определил 24 коэффициента по наблюдениям трех компонент в 12 точках, т. е. решил 36 уравнений с 24 неизвестными способом наименьших квадратов.

Практическое значение теории Гаусса может иметь только в том случае, если ряды (4.21) будут достаточно быстро сходиться. Многочисленные сферические гармонические анализы, проводившиеся со времен Гаусса до наших дней, показали, что

значения g и h с ростом n уменьшаются и начиная с $n > 8$ они находятся в пределах погрешностей измерений и расчетов.

Сферические гармонические анализы производятся в разных странах, и строятся соответствующие магнитные карты. Однако при проведении анализов и построении карт в различных странах используются несколько отличающиеся методы.

Для сравнения и согласования научных и прикладных исследований, полученных учеными разных стран, возникла потребность унификации сферических гармонических рядов, выбора единой международной аналитической модели главного геомагнитного поля (The International Geomagnetic Reference Field). Впервые такая модель была утверждена Международной ассоциацией по геомагнетизму и аэронавигации в 1970 г. С тех пор модели IGRF регулярно строятся и согласуются учеными разных стран.

Структура и основные характеристики главного поля

Как показал анализ рядов (4.21), члены ряда с $n = 1$ соответствуют полю геомагнитного диполя. Вид выражений для X , Y , Z при $n = 1$ аналогичен виду уравнений (4.10) теории Симонова с одной только разницей: в теории Симонова предполагалась однородная намагниченность Земли, в теории Гаусса — неоднородная. Член ряда Гаусса с $n = 2$ соответствует полю квадруполь (два диполя) и так далее: член с любым n описывает поле мультиполя соответствующего порядка. Сферические гармонические анализы показали, что главное геомагнитное поле состоит из дипольной части (более 80%) и недипольной (рис. 4.7). Чтобы получить недипольную часть, нужно из главного поля вычесть дипольное поле, рассчитанное по формулам (4.10). Недипольное поле называют также полем мировых аномалий или остаточным полем (рис. 4.8). Описание главного поля с помощью сферического анализа будет тем точнее, чем больше мультиполей все более высокого порядка (но не более чем $n = 10$), расположенных в центре Земли, будет учтено при построении соответствующих рядов.

Помимо главного поля вклад в полное поле, наблюдающееся на поверхности Земли, дают еще аномальное поле и внешнее электромагнитное поле. Однако сферический анализ не отражает этих полей, так как они очень малы по сравнению с главным. Таким образом, уравнения (4.21) до настоящего времени могут быть использованы только для анализа главного геомагнитного поля и его вековых вариаций.

Пользуясь формулами (4.10), можно определить основные характеристики дипольной части поля, которая, по существу,

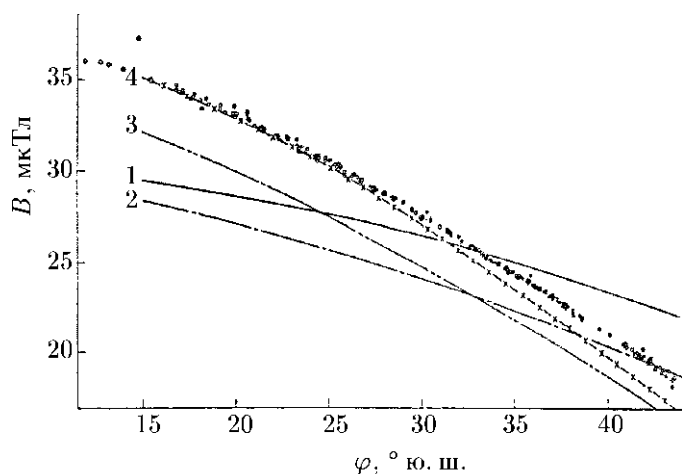


Рис. 4.7. Соответствие различных моделей главного геомагнитного поля реальному, полученному по данным измерений (кружки) (по Паркинсону, 1986): 1 — аксиальный диполь, 2 — наклоненный диполь, 3 — квадруполь, 4 — октуполь

является основной частью геомагнитного поля. Уравнения (4.8) для коэффициентов g_1^0 , g_1' , h_1' можно переписать в виде

$$\begin{aligned} g_1^0 &= \frac{M}{R^3} \cos \Theta_0, \\ g_1' &= \frac{M}{R^3} \sin \Theta_0 \cos \lambda_0, \\ h_1' &= \frac{M}{R^3} \sin \Theta_0 \sin \lambda_0. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Если на основе измерения X , Y , Z и решения уравнений (4.10) эти коэффициенты найдены, то согласно (4.22) можно рассчитать величину M магнитного момента Земли и координаты дипольного (геомагнитного) полюса Θ_0 , λ_0 :

$$M = R^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1')^2 + (h_1')^2}, \quad (4.23)$$

$$\operatorname{tg} \Theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1')^2 + (h_1')^2}}{g_1^0}, \quad \operatorname{tg} \lambda_0 = \frac{h_1'}{g_1'}. \quad (4.24)$$

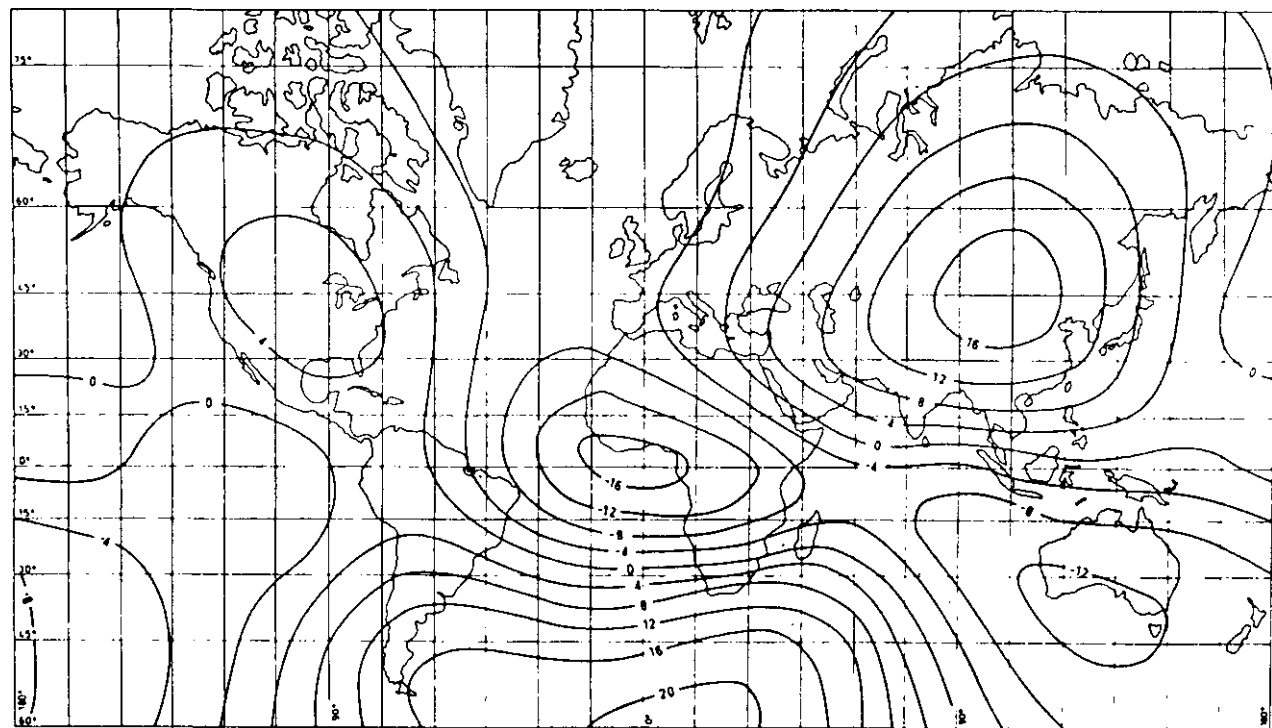


Рис. 4.8. Недипольная часть z -компоненты главного геомагнитного поля (по Паркинсону, 1986)

Так как географическая широта $\varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \Theta_0$, то

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{g_1^0}{\sqrt{(g_1')^2 + (h_1')^2}}. \quad (4.25)$$

Величина современного дипольного магнитного момента $M \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ (в СИ), координаты северного геомагнитного полюса $\varphi_0 = 78,5^\circ$ с. ш., $\lambda_0 \cong 70^\circ$ з. д. Геомагнитный полюс — условная точка пересечения оси диполя с поверхностью Земли — не совпадает с истинным магнитным полюсом, координаты которого $\varphi_0 \approx 75^\circ$ с. ш., $\lambda_0 \approx 100^\circ$ з. д. В табл. 4.1 дано сравнение магнитного поля Земли с полями других планет.

Пользуясь формулой (4.23), можно определить среднюю намагниченность Земли:

$$I = \frac{M}{V} = \frac{3}{4\pi} \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1')^2 + (h_1')^2}; \quad (4.26)$$

она равна $72 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. Такая величина I встречается только на некоторых изверженных горных породах, содержащих сильномагнитные магнетиты. Однако высокие магнитные свойства магнетита сохраняются до температур, не превышающих точку Кюри магнетита, равную 580°C . В связи с тем, что с глубиной температура вещества Земли повышается, сильномагнитные породы могут находиться на сравнительно небольших глубинах от поверхности Земли, не глубже 100 км. Средняя намагниченность пород в сферическом земном слое глубиной 100 км будет составлять около $1000 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. Пород с такой намагниченностью не существует, поэтому можно сделать вывод, что главное магнитное поле не вызвано намагниченностью Земли, оно может быть связано с электрическими токами, которые текут в жидком электропроводящем внешнем ядре Земли.

Еще в конце прошлого века было показано, что магнитное поле Земли более точно описывается диполем, помещенным не в центре, а на некотором расстоянии от центра Земли. Такой диполь называется эксцентрическим, а точка, в которую он помещается, магнитным центром Земли. Магнитный центр с 1830 г. по 1970 г. удалился от центра Земли на северо-запад с расстояния $0,04R$ до $0,07R$.

Дипольное магнитное поле в относительно малых объемах обладает высокой степенью однородности, его градиенты по радиусу Земли и по меридиану не превышают $10-20 \text{ нТл/км}$.

Как уже отмечалось, с течением времени величина и направление геомагнитного поля не остаются постоянными: имеют

Таблица 4.2. Спектр вековых вариаций

Период, лет	Амплитуда, нТл	Характер
8000	$25 \cdot 10^3$	глобальный
100	$4 \cdot 10^3$	глобальный
1200	$4 \cdot 10^3$	глобальный + региональный
900	$4 \cdot 10^3$	глобальный + региональный
600	$4 \cdot 10^3$	региональный + глобальный
360	$2 \cdot 10^3$	региональный + глобальный
60	$5 \cdot 10^2$	региональный

место вековые вариации, которые присущи в основном главному геомагнитному полю.

Характерную особенность имеет недипольная часть главного поля: она дрейфует с течением времени на запад. Явление западного дрейфа было замечено еще в XVII в., однако только в середине XX столетия удалось установить скорость дрейфа. Разные элементы геомагнитного поля дрейфуют с несколько различными скоростями, в среднем скорость западного дрейфа равна $\sim 0,2^\circ$ в год. Это означает, что полный оборот недипольного поля вокруг оси вращения Земли может произойти за 1800 лет. Предполагается, что физическим механизмом западного дрейфа является более высокая угловая скорость вращения мантии Земли по сравнению с внешним ядром.

Западный дрейф вносит существенный вклад в вековые вариации, но не объясняет их полностью. Существуют вековые вариации и дипольной части поля с характерным временем порядка 9000 лет. В последние несколько сот лет происходит уменьшение дипольного магнитного момента. Наиболее сильным изменениям с течением времени подвержена вертикальная составляющая поля, скорость изменений которой доходит до 100 нТл/год и более. Спектр вековых вариаций имеет дискретный характер, основные гармоники спектра представлены в табл. 4.2.

Аномальное геомагнитное поле

Горные породы, расположенные в верхних частях литосферы и на земной поверхности, намагничиваются в главном геомагнитном поле. Это намагничивание достаточно сильно из-за

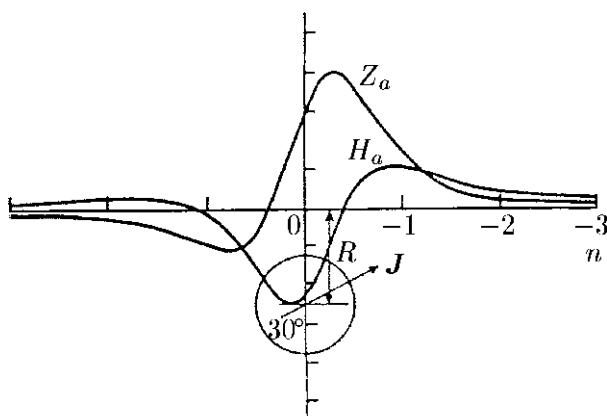


Рис. 4.9. Схема распределения компонент H_a и Z_a аномального поля, вызванного шаром, однородно намагниченным под углом $\Theta = 30^\circ$ к горизонтальной плоскости

присутствия в породах так называемых ферромагнитных минералов, наиболее сильномагнитным из которых является магнетит (Fe_3O_4). Вследствие намагничивания породы создают собственное аномальное поле $\mathbf{B}_a$, или поле магнитных аномалий. Рассмотрим в качестве примера аномальное поле, создаваемое неглубоко залегающим намагниченным шаром, магнитный момент M которого направлен под углом Θ к горизонтальной плоскости (рис. 4.9).

Магнитный потенциал в некоторой точке $Q(x, z)$ над поверхностью Земли равен

$$U = \frac{M}{r^2} \cos \gamma.$$

Учтем, что

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{x}{r} \cos \Theta + \frac{z}{r} \sin \Theta, \\ r^2 &= x^2 + z^2, \end{aligned}$$

и получим потенциал аномального поля

$$U_a = \frac{M (x \cos \Theta + z \sin \Theta)}{(x^2 + z^2)^{3/2}}. \quad (4.27)$$

Найдем компоненты аномального поля X_a , Z_a :

$$X_a = -\frac{\partial U}{\partial x} = M \frac{(2x^2 - z^2) \cos \Theta + 3xz \sin \Theta}{(x^2 + z^2)^{5/2}}, \quad (4.28)$$

$$Z_a = -\frac{\partial U}{\partial z} = M \frac{(2z^2 - x^2) \sin \Theta + 3xz \cos \Theta}{(x^2 + z^2)^{5/2}}. \quad (4.29)$$

Разумеется, для тел неправильной формы выражения для аномального поля имеют более сложный вид и их не всегда можно получить аналитически.

Аномальное поле, как правило, составляет 10^{-2} – 10^{-3} от главного поля, которое принято также называть нормальным, когда оно рассматривается совместно с аномальным. Когда выделяется локальная магнитная аномалия, то в качестве нормального рассматривается сумма полей: главное поле + поле региональных аномалий.

Несмотря на малую напряженность аномального поля, аномалия легко определяется по большой величине градиентов B_a . Из (4.29) при $x = 0$ получаем максимальное значение Z_a :

$$Z_{a \max} = \frac{2M}{z^3} \sin \Theta,$$

его градиент по вертикали равен

$$\frac{\partial Z_{a \max}}{\partial z} = -\frac{6M}{z^4} \sin \Theta = \frac{3Z_{a \max}}{z}, \quad (4.30)$$

где z — глубина залегания намагниченной породы. Положим, что $z = 50$ м, $Z_{a \max} = 10^{-3} Z_n$ (Z_n — нормальное, или главное, поле напряженностью $5 \cdot 10^4$ нТл). Тогда $\frac{\partial Z_{a \max}}{\partial z} = -3000$ нТл/км, т. е. на два порядка больше, чем градиенты нормального поля. Встречаются локальные и региональные аномалии очень высокой интенсивности. Уникальной является Курская магнитная аномалия, где аномальное поле в некоторых точках почти в 3 раза превосходит нормальное! Здесь обнаружено место, где магнитноеклонение $I = 90^\circ$, т. е. такое же, как на магнитном полюсе, это как бы третий магнитный полюс. Такая сильная аномалия вызвана мощными залежами железных руд (железистые кварциты) на сравнительно небольшой глубине (~ 200 – 300 м), запасы которых превышают запасы всех остальных железорудных месторождений земного шара, вместе взятых.

Для выделения аномального поля из наблюдаемого $\mathbf{B} = \mathbf{B}_n + \mathbf{B}_a$ используются методы, основанные на том, что источники $\mathbf{B}_a$ и $\mathbf{B}_n$ находятся на существенно разных глубинах. Одним из методов является метод вычитания из наблюдаемого поля $\mathbf{B}$ нормального (главного), определяемого суммой дипольного и мультипольного членов ряда Гаусса (например, поля IGRF).

Аномальное магнитное поле континентов имеет сложный характер, представляя во многих случаях сумму нескольких составляющих, имеющих различное геологическое происхождение. По локальным аномалиям методами интерпретации определяются глубины залегания верхних кромок тел, наиболее близко расположенных к поверхности. При рассмотрении аномального поля платформенных областей, где кристаллический фундамент погружен на глубину в несколько километров под практически немагнитными осадочными отложениями, можно оценить глубину залегания поверхности фундамента, содержащего магматические и метаморфические образования, обладающие высокой намагниченностью.

Принципиальным открытием было обнаружение отрицательных магнитных аномалий, число которых, как оказалось, сравнимо с положительными. Отрицательной называется такая аномалия, поле которой в Северном полушарии направлено в верхнюю часть пространства, над горизонтальной плоскостью, так что $\mathbf{B}_a$ почти антипараллельно $\mathbf{B}_n$.

Если бы породы намагничивались только по направлению современного геомагнитного поля, то существовали бы только положительные аномалии. Намагниченность $\mathbf{I}$ породы, как показали исследования, состоит из двух компонент:

$$\mathbf{I} = \kappa \mathbf{H}_T + \mathbf{I}_n, \quad (4.31)$$

где $\kappa \mathbf{H}_T$ — индуктивная намагниченность, всегда направленная по современному полю $\mathbf{H}_T$, $\mathbf{I}_n$ — естественная остаточная намагниченность (NRM). Было обнаружено, что во многих породах $\mathbf{I}_n$ не совпадает по направлению с современным полем и может от него отличаться на любой угол от 0 до 180°. Естественная остаточная намагниченность, как правило, возникает во время образования породы, и возраст $\mathbf{I}_n$ практически одинаков с возрастом породы. Отсюда был сделан вывод о том, что направление $\mathbf{I}_n$ горной породы отражает направление древнего магнитного поля, которое существовало в то геологическое время, когда образовалась данная порода.

В большинстве изверженных горных пород I_n по величине превышает H_G , и поэтому направление аномального поля определяется направлением I_n , т.е. направлением древнего магнитного поля. Следовательно, наличие отрицательных аномалий указывает на то, что они образовались в древнем поле, направление которого было обратным по отношению к современному геомагнитному полю.

Наличие в породах естественной остаточной намагниченности I_n , величина и направление которой отражает величину и направление древнего поля, которое было во время образования породы, дает возможность изучать историю геомагнитного поля в прошлые геологические эпохи. Такой косвенный метод изучения древнего магнитного поля называется палеомагнитным.

Палеомагнетизм

Палеомагнитный метод основан на двух основных предположениях. Геофизическое предположение состоит в том, что геомагнитное поле в прошлые геологические эпохи было полем центрального осесимметричного диполя, каковым является и основная часть современного поля. С физической точки зрения предполагается, что естественная остаточная намагниченность I_n совпадает в среднем с направлением древнего поля $H_{др}$, величина

I_n пропорциональна $H_{др}$ и в основном сохраняется в течение многих тысяч и миллионов лет до наших дней. Эти предположения не очевидны, и при каждом палеомагнитном исследовании их нужно проверять.

В принятой модели поля легко определить современные географические координаты древнего геомагнитного поля. В модели центрального осесимметричного диполя геомагнитные меридианы совпадают с географическими, а магнитные полюсы совпадают с географическими полюсами. Пусть в древней породе, залегающей в точке $Q(\varphi, \lambda)$, вектор I_n расположен так, как показано на рис. 4.10. Проекция I_n на

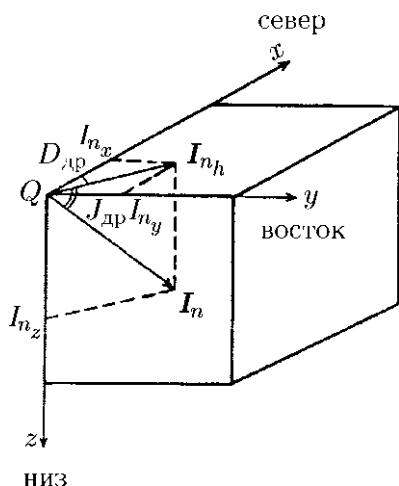


Рис. 4.10. Компоненты естественной остаточной намагниченности I_n горной породы в некоторой точке $Q(\varphi, \lambda)$

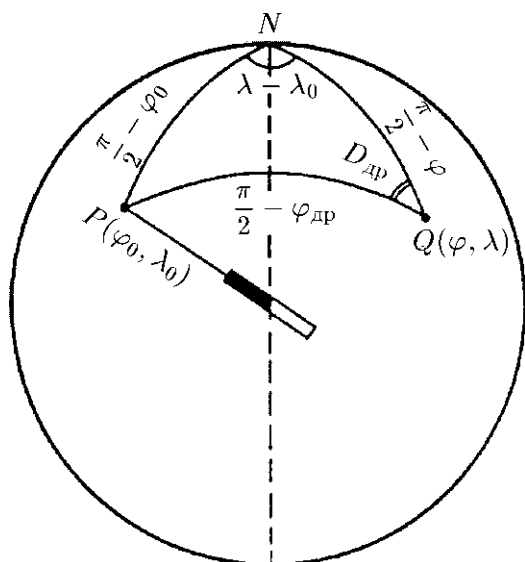


Рис. 4.11. Модель центрального осесимметричного геомагнитного поля, используемая в палеомагнитном методе

горизонтальную плоскость I_{nh} показывает направление древнего магнитного меридиана, угол $D_{др}$ есть угол между современным и древним меридианами. Направление I_n показывает направление вектора напряженности $H_{др}$. Поэтому угол между I_n и горизонтальной плоскостью является углом магнитного наклона $J_{др}$ древнего поля. Зная $J_{др}$, можно по формуле (4.12) определить древнюю географическую широту $\varphi_{др}$, на которой была данная порода в момент своего образования:

$$\operatorname{tg} \varphi_{др} = \frac{1}{2} \operatorname{tg} J_{др}. \quad (4.32)$$

Таким образом, из измерений компонент намагниченности I_n образца (эти измерения производятся, как правило, в лаборатории) мы определяем два важных параметра: угол $D_{др}$ и широту $\varphi_{др}$ (рис. 4.11).

Воспользовавшись теоремами косинусов и синусов сферической тригонометрии, получим следующие формулы для современных координат φ_0 , λ_0 древнего магнитного полюса:

$$\sin \varphi_0 = \sin \varphi \sin \varphi_{др} + \cos \varphi \cos \varphi_{др} \cos D_{др}, \quad (4.33)$$

$$\sin(\lambda - \lambda_0) = \frac{\sin D_{др}}{\cos \varphi_0} \cos \varphi_{др}. \quad (4.34)$$

Измеряя I_n пород разного геологического возраста, можно получить закономерности изменения дипольного поля начиная от очень древних геологических эпох до нашего времени. Палеомагнетизм — это уникальный метод в геофизике, основанный на удивительном свойстве «магнитной памяти» ферромагнитных минералов, входящих, хотя и в небольших количествах, в состав практически всех горных пород. Магнетизм ферромагнитных минералов дает основной вклад в магнитную восприимчивость горных пород. Вклад диа- и парамагнитных минералов очень мал.

Направление I_n для определенного геологического возраста в данной точке земной поверхности рассчитывается с применением статистических методов по достаточно большому числу образцов. По полученным данным с помощью формул (4.33) и (4.34) определяется положение соответствующего возрасту породы магнитного полюса. Такой полюс называется виртуальным магнитным полюсом. Среднее положение ряда виртуальных полюсов для пород данного возраста, расположенных в разных точках земной поверхности, называется палеомагнитным полюсом.

При проведении палеомагнитных исследований большое значение имеет выяснение физических механизмов намагничивания различных горных пород, установление степени сохранности I_n , ее соответствия времени образования породы. Установлено, что изверженные горные породы приобретают I_n в геомагнитном поле во время остывания после излияния на поверхность. Возникшая таким образом I_n называется термоостаточной (TRM), она имеет высокую интенсивность и большую стабильность. Осадочные горные породы, являющиеся продуктом переработки и перс-отложения изверженных пород, приобретают I_n в геомагнитном поле во время осаждения мелких частиц в водном бассейне (море, озеро). Мелкие намагниченные частицы в процессе осаждения ориентируются по направлению поля, и в результате возникает детритовая, или ориентационная, намагниченность осадочных горных пород. После образования I_n изверженные и осадочные породы находятся уже в других условиях (обычные температуры и отсутствие водной среды), при которых дальнейшего намагничивания горных пород в изменяющемся геомагнитном поле практически не происходит. Именно поэтому I_n пород, как правило, древнего происхождения и синхронна с образованием пород.

Проведенные во второй половине XX в. многочисленные палеомагнитные исследования привели к открытиям, которые существенно изменили геофизические и геологические концепции

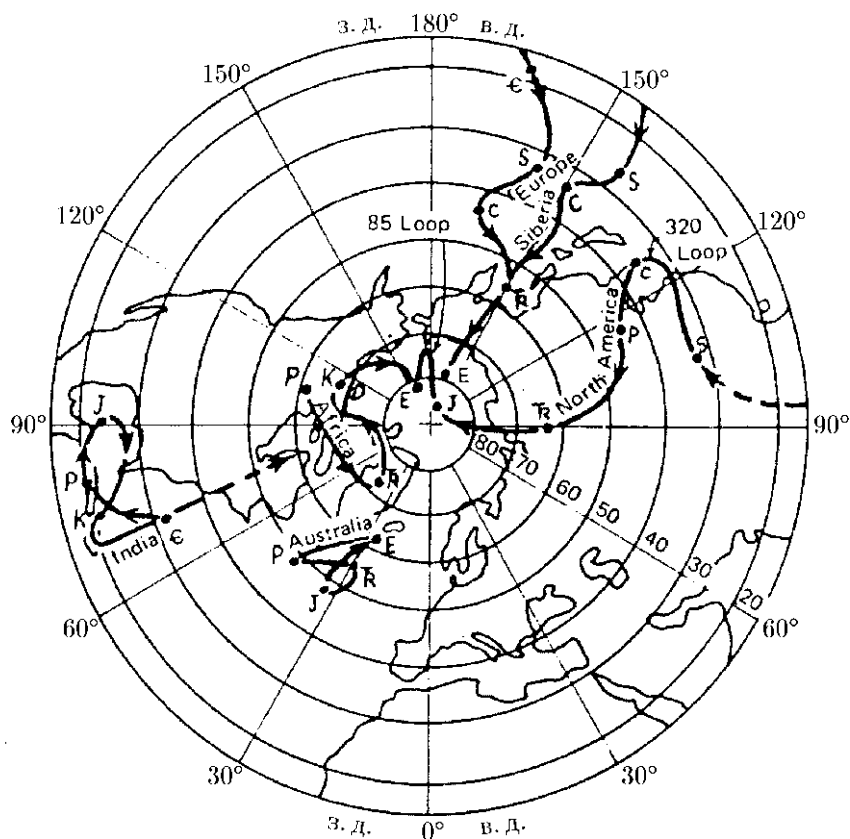


Рис. 4.12. Кривые миграции палеомагнитных полюсов, полученные на основе измерений I_n горных пород разных континентов (по Condie, 1975)

строения и эволюции литосферы. Наиболее принципиальными результатами являются следующие.

1. Палеомагнитные полюсы не совпадают с современным полюсом, при этом, чем древнее палеомагнитный полюс, тем на большем расстоянии от современного он находился. Кембрийский северный палеомагнитный полюс (возраст около 600 млн лет) находился южнее экватора.
2. Кривые миграции северных палеомагнитных полюсов, определенные по направлению естественной остаточной намагниченности I_n пород разных континентов, существенно различны (рис. 4.12).

3. Геомагнитное поле в прошлые геологические эпохи неоднократно изменяло свою полярность: происходили инверсии поля, которых начиная с кембрия насчитывается более тысячи. Шкала инверсий, датированная абсолютными методами, называется магнитохронологической шкалой (рис. 4.13).

Проанализируем кратко эти результаты. По модели центрального осесимметричного диполя магнитный полюс совпадает с географическим. Следовательно, обнаруженная миграция магнитного полюса должна одновременно рассматриваться и как миграция географического, т.е. оси вращения Земли. Вследствие закона сохранения момента количества движения изменение положения оси вращения требует наличия таких огромных сил, которых мы не видим ни на Земле, ни в космическом пространстве. Поэтому первый результат можно рассматривать не как перемещение полюса, а как движение (в противоположную сторону) верхней литосферной оболочки Земли. Такая интерпретация подтверждается вторым результатом. Ведь Северный полюс должен быть один, а не несколько, как это следует из второго результата. Поэтому расхождение кривых миграции полюсов разных континентов свидетельствует о том, что литосферная оболочка не перемещалась как единое целое, а двигались отдельные литосферные плиты, причем каждая по своей траектории.

Наконец, третий результат указывает на то, что геомагнитному полю присущи не только вековые вариации, но и более глубокие изменения — инверсии. Этот результат дополняет картину основных свойств поля и имеет огромное теоретическое значение при решении проблемы происхождения геомагнитного поля. Кроме того, временная шкала инверсий может служить независимым инструментом для определения возраста горных пород, что является фундаментальной задачей геологии.

Изучение аномального магнитного поля океана, предпринятое в последние десятилетия с помощью протонных и квантовых магнитометров, привело к результатам, которые оказались в прямой связи с результатами палеомагнитных исследований.

Протошные и квантовые магнитометры дают возможность проводить непрерывную запись магнитных профилей, что позволило осуществить точное и детальное магнитное картирование океанского дна. В результате были получены совершенно неожиданные картины океанских аномалий. В отличие от сложной формы аномалий на суше, которая сильно меняется от района к району, океанские магнитные аномалии имеют систематический

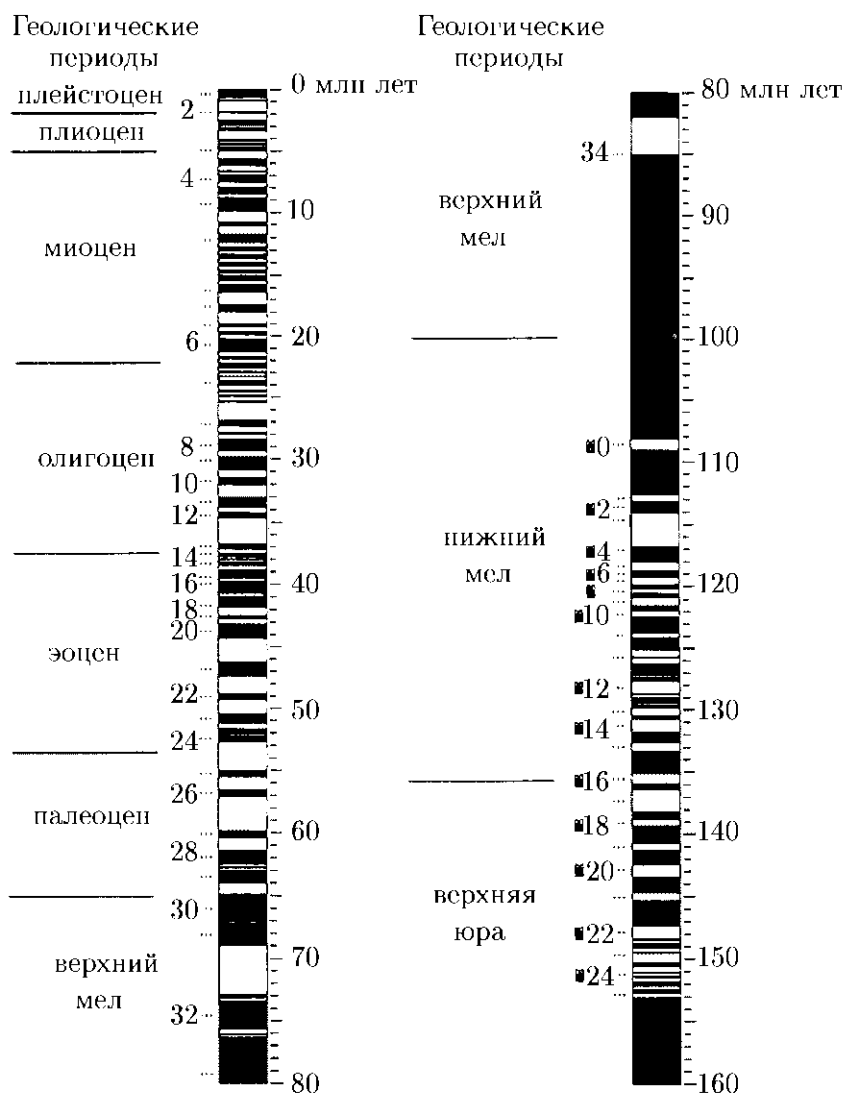


Рис. 4.13. Магнитохронологическая шкала, используемая для определения возраста линейных океанских аномалий. Слева от шкалы — номера аномалий, справа — возраст в млн лет (по Larson, Pitman, 1972)

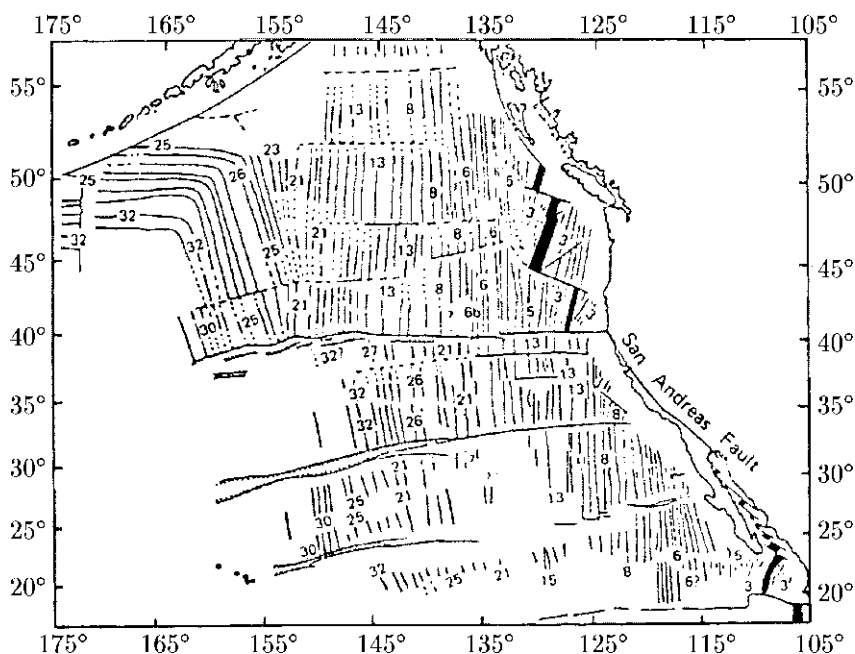


Рис. 4.14. Распределение линейных магнитных аномалий в Тихом океане (по Мепард, 1969). Номера аномалий сопоставляются с их возрастом согласно рис. 4.13

характер почти на всех океанах. Параллельные полосы чередующихся знакопеременных аномалий тянутся на тысячи километров. На рис. 4.14 изображена общая картина мировых океанских аномалий. Интенсивность аномалий высока. Хотя они измерены на уровне моря, т. е. на высоте от 2 до 5 км над морским дном, их амплитуды изменяются от нескольких сотен до тысячи нТл. Приборы измеряли модуль T напряженности геомагнитного поля. Аномальная часть ΔT_a поля определялась как разность модулей полного T и нормального T_n полей:

$$\Delta T_a = T - T_n.$$

Геология океанского дна также существенно отличается от геологии континентов. Измерения глубин океанов показали, что на дне каждого океана существуют большие горные хребты, названные срединно-океанскими хребтами (СОХ). Наиболее протяженным является Срединно-Атлантический хребт, протянувшийся от Исландии на юг по всей длине Атлантического океана

параллельно береговым линиям Африки и Америки и далее на восток южнее Африки в Индийский океан (1 на рис. 4.15). Аналогичные, но меньшие по размерам хребты есть в Индийском и Тихом океанах (2–4 на рис. 4.15). Вдоль хребтов располагаются эпицентры землетрясений.

Для объяснения такой структуры океанского дна была выдвинута гипотеза о том, что дно образуется в результате внедрения изверженных пород в центральной части (рифтовые долины) океанских хребтов. Эти породы оттесняются в стороны, когда новая магма изливается в том же самом месте.

За 200–300 млн лет все раздвигающееся океанское дно обновляется, а прежние породы погружаются в мантию в так называемых зонах субдукции.

На основе этой модели Вайн и Мэтьюз объяснили происхождение линейных магнитных аномалий. После того как расплавы, поднимающиеся из мантии, затвердевают, они приобретают термоостаточную намагниченность I_n , соответствующую направлению поля в это время. Новые порции магмы, появляющиеся в том же месте, при охлаждении могут намагнититься уже в поле противоположного знака в результате происходящих с течением времени инверсий. Поэтому чередование положительных и отрицательных аномалий — это результат чередования прямо- и обратнопонамагниченных участков океанской коры. Таким образом, картина линейных магнитных аномалий является естественным следствием расширения (спрединга) океанского дна и инверсий геомагнитного поля. Линейные магнитные аномалии океана являются, по существу, палеомагнитными аномалиями, непосредственно связанными с магнитохронологией инверсий геомагнитного поля. Такая связь позволяет оценить время, протекшее между образованием любых двух аномалий. А зная их положение на океанском дне, можно рассчитать скорость спрединга дна в данном регионе океана.

Происхождение главного поля

Для того чтобы выдвинуть разумные гипотезы о происхождении главного геомагнитного поля, необходимо достаточно хорошо знать, во-первых, основные свойства поля и, во-вторых, внутреннее строение Земли. Любая современная теория генерации главного поля не должна противоречить данным о его свойствах, основные из которых, как было показано выше, следующие.

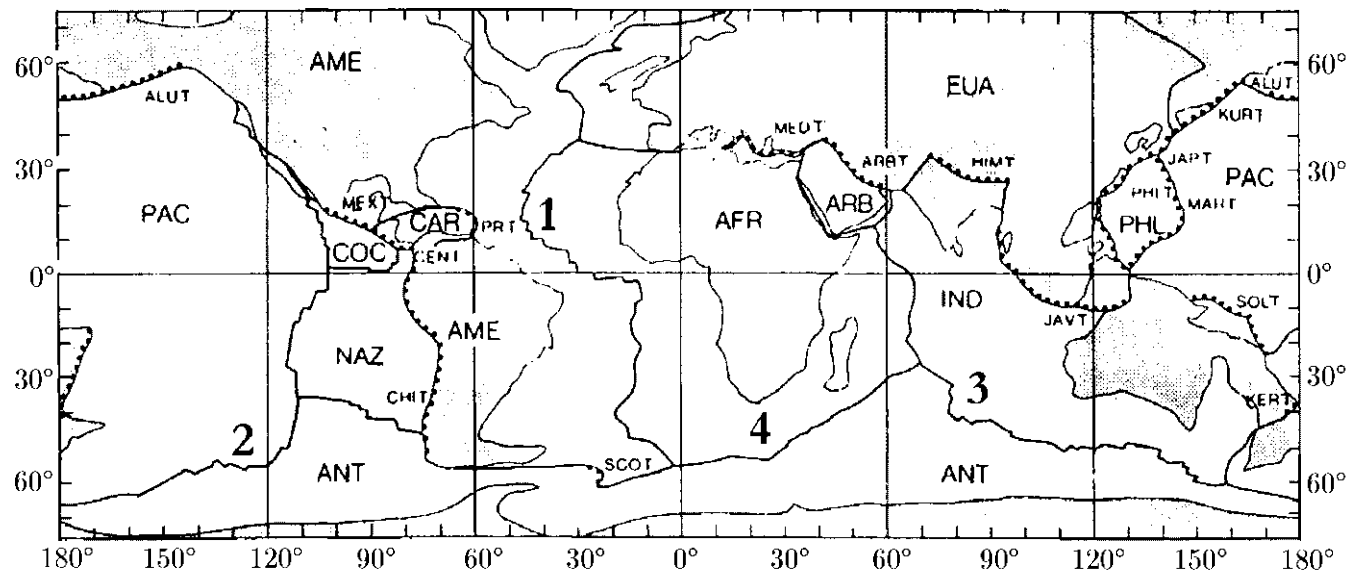


Рис. 4.15. Схема срединно-океанских подводных хребтов (цифрой 1 обозначен Срединно-Атлантический) (по Solomon, Sleep, 1974)

1. В первом приближении главное поле является полем центрального наклоненного к оси вращения Земли магнитного диполя.
2. Напряженность поля изменяется в среднем от $35 \cdot 10^3$ нТл на экваторе до $65 \cdot 10^3$ нТл на полюсах.
3. Магнитный момент земного диполя приблизительно равен $8 \cdot 10^{22}$ А · м².
4. Главному полю присущи вековые вариации, имеющие дискретный спектр с определенным набором периодов колебаний.
5. Имеет место западный дрейф недипольной части главного поля.
6. Главное поле время от времени изменяет свою полярность — происходят инверсии геомагнитного поля через характерные периоды 10^5 – 10^6 лет. Это косвенный результат, полученный по палеомагнитным данным.

Разумеется, ученые-геомагнитологи не откладывали вопрос о происхождении поля на то время, когда выяснятся все его свойства. Можно с уверенностью сказать, что и сейчас далеко не все свойства геомагнитного поля нам известны. Поэтому, начиная с Гильберта (1600 г.), выдвигались самые разнообразные, в том числе и совершенно фантастические, гипотезы о происхождении геомагнитного поля, о которых можно прочитать в соответствующих книгах по геомагнетизму.

Если говорить о современных теориях геомагнитного поля, то следует начать с теории динамоэффекта Френкеля (1947 г.), который впервые выдвинул разумную идею регенерации поля за счет вихревых движений в жидком электропроводящем ядре. В дальнейшем основополагающие работы по теории земного динамо выполнили Эльзассер и Буллард. Основой современных теорий являются уравнения Максвелла и гидродинамические уравнения движения жидкости Навье–Стокса и уравнение неразрывности.

Рассмотрим уравнения Максвелла:

$$\begin{aligned}
 \operatorname{rot} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{j}, \\
 \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\
 \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \\
 \mathbf{j} &= \sigma (\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]),
 \end{aligned}
 \tag{4.35}$$

где μ — магнитная проницаемость (она может быть равной μ_0), σ — электропроводность, $\mathbf{j}$ — плотность тока, $\mathbf{E}$ — электрическая напряженность, $\mathbf{v}$ — скорость движения проводящей жидкости. Применим операцию **rot** к первому уравнению системы (4.35), при этом учтем также второе и четвертое уравнения этой системы:

$$\mathbf{rot} \mathbf{rot} \mathbf{B} = \mu\sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{rot} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right).$$

Из этого уравнения с учетом того, что

$$\mathbf{rot} \mathbf{rot} \mathbf{B} = \mathbf{grad} \operatorname{div} \mathbf{B} - \nabla^2 \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{B},$$

получим уравнение для магнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{rot} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] + \frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (4.36)$$

где $\nu_m = \frac{1}{\mu\sigma}$ — магнитная вязкость, которая может рассматриваться как аналог кинематической вязкости ν .

В (4.36) помимо $\mathbf{B}$ есть еще неизвестное $\mathbf{v}$, для определения которого следует использовать гидродинамические уравнения. Уравнение движения запишем в форме Навье–Стокса:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \mathbf{grad} P + \nu \Delta^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} - 2[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}] + \frac{1}{\rho} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]. \quad (4.37)$$

В гидродинамике оператор

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad}).$$

Выражая в (4.37) $\mathbf{j}$ согласно первому уравнению (4.35), получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{grad} \mathbf{v}) = & -\frac{1}{\rho} \mathbf{grad} P + \nu \Delta^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} - \\ & - 2[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}] + \frac{1}{\mu\rho} [\mathbf{rot} \mathbf{B} \times \mathbf{B}]. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Уравнение (4.38) — уравнение движения единицы объема жидкости, ρ — ее плотность, P — давление за вычетом гидростатического, ν — кинематическая вязкость, член $2[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}]$ — сила Кориолиса, где $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость вращения Земли. Последний член правой части представляет силу Лоренца. Для полного замыкания системы уравнений магнитной гидродинамики

к (4.36) и (4.38) следует еще добавить уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (4.39)$$

которое для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) будет иметь вид

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \quad (4.40)$$

В принципе, уравнения магнитной гидродинамики дают возможность в случае их строгого решения определить, существует ли самовозбуждающееся динамо в ядре Земли. Однако, даже если были бы точно известны все члены уравнений, решение их было бы крайне затруднительно. А если учесть, что в применении к ядру Земли значения многих параметров уравнений либо известны приблизительно, либо вообще неизвестны, то задача гидромагнитного динамо Земли в такой общей постановке в настоящее время неразрешима.

Простейший начальный подход к проблеме генерации главного поля заключается в построении кинематических моделей земного динамо. При этом скорость жидкости считается заданной, а определяется только магнитное поле согласно (4.36). Выбор скорости частично определяется данными наблюдений, частично — соображениями симметрии и самой формой уравнений генерации. Например, наличие западного дрейфа указывает на существование азимутальной скорости и дает порядок ее величины. Уже первые кинематические модели показали, что кроме меридионального (полоидального) поля, которое проникает наружу и наблюдается на поверхности Земли, в земном ядре имеется также гораздо большее азимутальное (тороидальное) поле с замкнутыми силовыми линиями, которое не выходит из ядра наружу. Относительная скорость ядра и мантии возникает за счет значительного магнитного взаимодействия мантии с ядром.

С. И. Брагинский рассмотрел кинематические модели с помощью уравнений генерации и показал, что можно подобрать правдоподобные скорости в ядре, которые приводят к генерации магнитного поля, близкого к реально наблюдающемуся. Из теории вытекает, что наличие несимметричных скоростей, необходимых для генерации поля, вызывает появление соответствующих несимметричных компонент магнитного поля $\mathbf{B}$.

Согласно теории С. И. Брагинского, возникающая в результате действия гидромагнитного динамо генерация главного поля не является стационарной, а испытывает ряд колебаний, которые можно сопоставить с вековыми вариациями геомагнитного поля.

Основное колебание поля с $T \approx 8000$ лет, представляющее изменение дипольной части поля в 1,5–2,0 раза, связано, согласно теории, со временем взаимодействия между тороидальными и полоидальными полями в объеме ядра Земли в процессе крупномасштабной конвекции вещества ядра. Колебания с $T \approx 600$ –1800 лет, обуславливающие движение и распад крупных неоднородностей геомагнитного поля, объясняются неустойчивостью осесимметричного радиального потока вещества в низких широтах, при которой взаимодействие магнитных, архимедовых и кориолисовых сил приводит к возникновению так называемых МАК-волн, движущихся в широтном направлении.

60-летние вариации, по С. И. Брагинскому, объясняются крупными колебаниями в системе ядро–мантия, возникающими при движении альвеновской волны в жидком ядре Земли. Вариации с $T \approx 4$ –40 лет внутриземного происхождения связаны с мелкомасштабными турбулентностями в верхних частях ядра, осуществляющими более эффективное «перемешивание», чем механизм молекулярного переноса.

Существуют и другие подходы к теории происхождения геомагнитного поля. Теория гидромагнитного динамо является только наиболее распространенной среди геофизиков. Однако и в этой теории разработаны лишь кинематические аспекты, практически не разработанными остаются проблемы динамики и энергетики земного динамо.

Механизм генерации квазидипольного геомагнитного поля был бы достаточно прост и эффективен, если бы во внешнем ядре Земли возникал тороидальный ток, а не магнитное поле. Тороидальный ток естественно генерировал бы азимутальное (полоидальное) поле, которое мы и наблюдаем на поверхности Земли.

Новосибирский физик В. В. Аксенов в 2002 г. на основе принципиально нового анализа структуры геомагнитного поля показал, что в ядре Земли вследствие его сферичности возможно возникновение тороидальных токов. Однако никаких других подтверждений новой концепции возникновения геомагнитного поля за счет тороидальных токов пока нет.

Глава 5

Литосфера Земли и ее эволюция

Литосфера и астеносфера

Достаточно детально сейсмическими и другими геофизическими методами изучена верхняя мантия Земли. Эта часть Земли наиболее доступна для геофизического изучения и наиболее важна для жизни человечества. Верхняя мантия простирается от границы Мохора до глубины 400 км. В состав верхней мантии входит нижняя часть литосферы и верхняя часть астеносферы. Литосфера представляет собой каменную (твердую и прочную) верхнюю оболочку Земли. Ее толщина меняется от 50 до 150 км в разных регионах Земли, следовательно, литосфера включает земную кору и часть верхней мантии, в которой мантийное вещество настолько остыло, что превратилось в горную породу.

Глубже литосферы находится зона пониженных скоростей (по сравнению с таковыми в литосфере) сейсмических волн. Эта зона, простирающаяся от подошвы литосферы до $\sim 300\text{--}400$ км, называется астеносферой. Слои астеносферы легко деформируются под действием сдвиговых напряжений за счет пластичности (ползучести) астеносферного вещества. Такое поведение вещества связано с его частичным плавлением. Прохождение поперечных сейсмических волн через астеносферу указывает на то, что плавление не может быть полным и вещество должно находиться в состоянии, близком к твердому. Процент расплава вещества по разным косвенным данным изменяется от нескольких единиц до 20%. Такое состояние астеносферы приводит к достаточно сильному затуханию поперечных сейсмических волн. Существуют участки под литосферой, где астеносфера не фиксируется.

Литосфера в зависимости от географических координат изменяется не только по толщине, она вообще не является однородной монолитной оболочкой. Основную структуру литосферы можно понять, рассматривая строение поверхности Земли. В первом приближении поверхность разделяется на приподнятый над средним уровнем моря континентальный регион и опущенный океанский регион. К континентам примыкает материковая

отмель (шельф), затем идет с резким углублением континентальный склон, переходящий в типичное океанское дно. Рассыпанные в океанах острова, цепочки островов, островные дуги, отделяющие от океанов краевые моря, являются самостоятельными структурами, имеющими свое особое строение и историю. Средний уровень океанского дна расположен на 4,6 км ниже среднего уровня суши.

Если мысленно рассматривать сверху земной шар без его водной оболочки, то можно увидеть горные системы и обширные равнины на океанском дне — линейные системы срединно-океанских хребтов и глубоководных желобов, которые во многих местах разорваны трансформными разломами. Эти линейные системы делят литосферу на части, называемые литосферными плитами. Линейные системы характеризуются высоким уровнем сейсмичности, поэтому на карте их можно выделить по оконтуривающим их узким поясам сейсмичности (см. рис. 4.15). Как следует из рис. 4.15, разделение литосферы на плиты не связано с разделением на материки и океаны. Большинство плит включает как материковые, так и океанские участки. Только одна крупная плита (Тихоокеанская) имеет исключительно океанскую поверхность. Границы плит бывают трех типов: 1) конструктивные границы, где происходит наращивание плит, 2) деструктивные границы — границы поглощения плит и 3) границы скольжения, связанные с трансформными разломами. Каждый тип границ имеет свое выражение в рельефе, что позволяет проводить разбиение литосферы на плиты на основе данных о геологическом строении Земли.

Срединно-океанские хребты и внутриконтинентальные рифтовые зоны образуют единую глобальную систему рифтов (разломов). Оба типа структур являются зонами, где действуют напряжения растяжения. Срединно-океанские хребты имеют ширину одну-две тысячи километров и возвышаются над дном океанских котловин на 2–3 км. Полная протяженность хребтов составляет около 80 000 км. На осях большинства хребтов расположены рифтовые долины шириной 10–20 км и глубиной (от гребней гор) — 2 км.

Земная кора

Охарактеризуем кратко верхнюю оболочку литосферы — земную кору. Земная кора отличается от подкорковых частей литосферы строением и химическим составом. Как отмечалось выше, граница, отделяющая кору от верхней мантии, открыта

сейсмологом Мохоровичичем, она характеризуется резким скачком скоростей P -волн от 7,4 до 8,2 км/с. На формирование поверхности земной коры оказывают воздействие тектонические движения, создающие неровности рельефа, процессы денудации рельефа за счет разрушения и выветривания слагающих его горных пород, а также процессы осадконакопления. Максимальная контрастность рельефа наблюдается в местах наибольшей современной тектонической активности Земли, например, перепад рельефа между Перуано-Чилийским глубоководным желобом и вершинами Анд достигает 16–17 км. Значительные контрасты высот (7–8 км) и большая расчлененность рельефа наблюдаются в современных зонах столкновения континентов, например в Альпийско-Гималайском складчатом поясе за счет давления врезавшейся в Азию Индии.

Более древние горные пояса, такие, как Урал и Аппалачи, денудированы настолько, что перепады высот в них не превышают 1–2 км. Постоянно накапливающиеся во впадинах осадочные толщи погребают под собой формы рельефа коренных пород земной коры.

Геолого-геофизические исследования показали, что существует два типа земной коры: более плотная базальтовая кора под океанами и менее плотная гранитная кора континентов.

Океанская кора представляет собой верхний дифференцированный слой мантии, перекрытый сверху тонким слоем пелагических осадков. Океанская кора состоит из трех слоев. Слой 1 лежит непосредственно под морской водой, средняя толщина водного слоя 4,5 км, скорость P -волн в нем 1,5 км/с. Скорость P -волн в слое 1, образованном пелагическими осадками, составляет 1,6–2,5 км/с, его средняя толщина 0,4 км. Слой 2 в верхней части сложен подушечными лавами толеитовых базальтов океанского типа (слой 2а), ниже располагаются долеритовые дайки того же состава (слой 2б). Скорость P -волн в слое 2 изменяется от 4 до 6 км/с, средняя толщина составляет 1,5 км. Верхняя часть слоя 3 сложена габбро, нижняя часть — серпентинитами. Скорость P -волн в слое 3 составляет 6,4–7,0 км/с, его средняя толщина 5 км. Таким образом, общая толщина (или мощность) океанской коры 7 км.

На границе Мохоро наблюдается скачок скорости P -волн от 6,4 до 8,6 км/с.

В связи с тем, что океанское дно постоянно обновляется за счет процесса спрединга с постоянным погружением океанской коры и накопившихся на ней осадков в мантию, океанские впадины так и не успели засыпаться осадками. Это приводит также к

тому, что возраст океанского дна повсеместно оказывается сравнительно молодым, он не превышает 160 млн лет, вода океанов намного древнее, ее возраст достигает 3 млрд лет.

Основными структурами дна океанов являются океанские котловины, океанские хребты, глубоководные желоба и континентальные окраины, которые в свою очередь состоят из шельфа, материкового склона и материкового подножия.

Континентальная кора как по строению, так и по составу резко отличается от океанской. Ее толщина изменяется от 20–25 км под островными дугами и участками с переходным типом коры до 80 км под молодыми складчатыми поясами Земли. Средняя толщина коры 35 км. Строение континентальной коры в противоположность океанской более сложное и неоднородное. Однако в ней также выделяют три слоя: верхний осадочный и два нижних, сложенных кристаллическими породами. Почти повсеместно под континентальной корой определяется граница Мохо. Скорости сейсмических *P*-волн в слоях коры нарастают сверху вниз: от 2 до 5,5 км/с в осадочном слое, 6–6,5 км/с в верхнем слое, 6,6–7,0 км/с в нижнем слое, ниже границы Мохо — 8–8,2 км/с.

Верхний слой кристаллических пород представлен древними докембрийскими породами гранитогнейсового состава, поэтому его иногда называют «гранитным». Нижний слой сложен породами среднего и основного состава, метаморфизованными до амфиболитовой и даже гранулитовой фракции. Нижний слой иногда называют «базальтовым».

Проблемы концепции тектоники плит

Вышеупомянутые представления о процессах раздвижения (спрединга) океанского дна, движения литосферных плит, а также выводы о возрасте ложа океана и океанской воды рассмотрены в книге в рамках наиболее общепринятой в настоящее время геолого-геофизической концепции тектоники литосферных плит.

В геофизике уже давно существовали два принципиально различных подхода к рассмотрению эволюции нашей планеты: фиксизм (стабильное развитие) и мобилизм.

Мобилизм как антитеза развитию Земли возник в 1915 г. после выхода в свет книги немецкого геофизика Альфреда Вегенера «Происхождение материков и океанов». Основываясь на сходстве (зеркальной симметрии) очертаний противоположных берегов Атлантического океана и привлекая к рассмотрению другие, известные в то время, геофизические материалы (гипсометрическую карту Земли, теорию изостазии, данные о скоростях *c*-волн под континентами и океанами), Вегенер предположил, что

современная структура материков является следствием раскола древнего праматерика Пангеи и раздвижения его отдельных частей под действием силы вращения Земли. Складчатые горные цепи, по представлению Вегенера, возникали перед фронтом движущегося материка. Сторонников идей Вегенера было существенно меньше, чем противников, поэтому идеи мобилизма активно не развивались.

Всплеск идей мобилизма приходится на пятидесятые годы XX столетия. Это было связано прежде всего с тем, что сейсмическими исследованиями было установлено, что земная кора под океанами сильно отличается от континентальной, она очень тонка (5–10 км). Кроме того, в эти годы начали развиваться палеомагнитные исследования, которые давали возможность получения количественных оценок масштабов перемещения отдельных литосферных блоков. В частности, палеомагнитные данные показали, что в позднем палеозое и в мезозое имело место отодвигание Европы от Северной Америки, что подтверждало гипотезу Вегенера. В 50-е годы ряд исследователей выступил с идеями неомобилизма, суть которых состояла в предположении существования течений в глубине Земли, под действием которых происходит перемещение континентов или их частей.

Основополагающие идеи концепции тектоники плит были сформулированы в 1962 г. в статьях Р. Дитца и Г. Хесса. Суть идей состоит в том, что на осях подводных срединно-океанских хребтов (САХ) в результате магмоизвержений происходит образование новой океанской коры, которая симметрично растекается в стороны. Причиной этого растекания (спрединга) является тепловая конвекция в мантии. Р. Дитц писал: «Срединно-океанские хребты маркируют восходящие мантийные потоки, или зоны дивергенции; глубоководные желоба ассоциируются с зонами конвергенции, или с нисходящими мантийными потоками». Таким образом, в природе существуют как бы ленты эскалаторов, которые выходят в центральных частях подводных хребтов, движутся вдоль ложа океана и погружаются перед континентами в глубоководных желобах.

Существенным дополнением к этим идеям явилась опубликованная в 1963 г. гипотеза Ф. Вайна и Д. Мэтьюза, связавшая растянутые во времени образование в центрах САХ горных пород и их движение в стороны от хребтов с инверсиями геомагнитного поля. Тем самым было дано объяснение образованию знакопеременных линейных аномалий, симметричных по обе стороны хребтов.

Интенсивная вулканическая деятельность в некоторых местах внутри литосферных плит (как под океанами, так и на континентах), согласно концепции тектоники плит, связана с существованием так называемых «горячих точек», которые находятся на большой глубине (ниже основания литосферных плит). «Горячие точки» — длительно действующие магматические очаги — поставляют на поверхность континентов и океанов базальтовую магму, при этом очаг «горячей точки» остается на месте, а вышележащие литосферные плиты перемещаются. В результате на поверхности Земли образуется цепочка вулканов, возраст которых уменьшается в направлении, обратном движению плиты.

В рамках концепции тектоники плит было предложено и объяснение раскола Пангеи и раздвижения ее обломков (современных материков) и образования между ними Атлантического, Индийского и других океанов.

Однако очень красивая и убедительная концепция тектоники плит (КТП) пока не в состоянии ответить на ряд вопросов, относящихся к геологической истории и эволюции Земли. Прежде всего, геологические события, которые рассматривает КТП, относятся к последним 400 млн лет. Возникает вопрос, как быть со всей 4,5-миллиарднолетней тектонической историей планеты. Сторонники КТП оказались перед дилеммой: 1) механизм КТП начал действовать с конца палеозоя (400–500 млн лет назад), а ранее дрейфа не было или 2) в истории Земли всегда существовали механизмы плитотектоники и поэтому, по крайней мере трижды, происходил раскол суперматерика, обломки которого вновь объединялись в Пангею.

Один из крупнейших геофизиков XX в. академик В. А. Магницкий еще в 1960 г. писал: «Можно уверенно говорить, что земная кора выделилась из оболочки в процессе развития Земли, поэтому из установленного наблюдениями равенства тепловых потоков на континентах и океанах следует вывод, что не существовало крупных горизонтальных перемещений, порядка тысяч километров, больших блоков земной коры, как то предполагает гипотеза мобилизма. В противном случае это привело бы к

отличию интенсивности тепловых потоков на континентах и океанах в 1,5–2 раза. Следовательно, континенты и океаны в общем возникли примерно на тех местах, где они сейчас расположены».

Как отмечалось, важную роль в обосновании КТП сыграли результаты палеомагнитных исследований, которые дали возможность количественно оценить масштабы перемещений литосферных блоков. Однако в основу палеомагнитных расчетов были заложены предположения, которые далеко не в полной мере выполняются в реальной действительности.

Первое — предположение о том, что в качестве модели геомагнитного поля, по крайней мере за последние 600 млн лет, можно взять поле центрального осесимметричного диполя. Эта модель очень груба и для современного поля. Кроме того, в настоящее время расчетная ось магнитного диполя наклонена к оси вращения на угол около 12° и существенно (на $2\text{--}3^\circ$) изменяет свое положение относительно стабильной оси вращения в последние 300 лет, в течение которых ведутся измерения геомагнитного поля. Что было за прошлые сотни миллионов лет, трудно сказать.

В модели центрального осесимметричного диполя древняя широта $\varphi_{\text{др}}$ точки наблюдения, где производится отбор образцов, определяется простой формулой

$$\varphi_{\text{др}} = \arctg \frac{1}{2} \operatorname{tg} J_{\text{др}}. \quad (5.1)$$

Здесь $J_{\text{др}}$ — угол наклона древнего поля, который определяется по направлению естественной остаточной намагниченности горной породы I_n (рис. 4.10):

$$\operatorname{tg} J_{\text{др}} = \frac{I_{nz}}{I_{nh}}, \quad (5.2)$$

где I_{nz} , I_{nh} — вертикальная и горизонтальная составляющие I_n .

Если же в палеомагнетизме в качестве модели геомагнитного поля принять поле центрального диполя, наклоненного под некоторым углом к оси вращения Земли, то расчеты древней широты $\varphi_{\text{др}}$ точки наблюдения произвести практически невозможно.

В этом случае выражение для $\operatorname{tg} J_{\text{др}}$ имеет такой вид:

$$\operatorname{tg} J_{\text{др}} = 2 \left[g_1^0 \sin \varphi_{\text{др}} + (g_1' \cos \lambda_{\text{др}} + h_1' \sin \lambda_{\text{др}}) \cos \varphi_{\text{др}} \right] \times \\ \times \left\{ \left[g_1^0 \cos \varphi_{\text{др}} - (g_1' \cos \lambda_{\text{др}} + h_1' \sin \lambda_{\text{др}}) \sin \varphi_{\text{др}} \right]^2 + \right. \\ \left. + \left(g_1' \sin \lambda_{\text{др}} - h_1' \cos \lambda_{\text{др}} \right)^2 \right\}^{-1/2}, \quad (5.3)$$

где g_1^0 , g_1' , h_1' неизвестны, они определяют координаты и магнитный момент древнего геомагнитного поля; неизвестны также $\varphi_{\text{др}}$ и $\lambda_{\text{др}}$. Очевидно, что такое уравнение со многими неизвестными не подходит для нахождения $\varphi_{\text{др}}$.

Согласно второму предположению, естественная остаточная намагниченность NRM древних (до 600 млн лет) горных пород, в основном, отражает направление и величину древнего геомагнитного поля. На самом деле, NRM отражает всю магнитную, химическую, тектоническую и термическую историю горной породы.

Задача определения древнего поля по величине и направлению NRM очень сложна и неоднозначна. По-видимому, в ряде случаев (на достаточно молодых и хорошо сохранившихся древних породах) ее удастся решить.

Обратим внимание еще на одну, принципиальную для КТП, неоднозначность палеомагнитных данных. На основе данных об изменении на 180° направления NRM в горных породах сделан вывод об инверсиях геомагнитного поля. Однако поворот намагниченности на 180° возможен не только при смене направления магнитного поля на 180° , он возможен без изменения направления поля за счет специфических свойств ферромагнитных минералов — носителей намагниченности. Такое явление поворота на 180° намагниченности без изменения направления поля называется самообращением намагниченности.

Таким образом, на величину и направление NRM, по параметрам которой мы определяем элементы древнего геомагнитного поля, могут влиять не только внешние факторы (поле H и т. д.), но и специфические магнитные свойства ферромагнитных минералов. Ввиду важности этого вопроса рассмотрим его более подробно.

Самообращение намагниченности горных пород

Энергия магнитного момента $\mathbf{M}$ во внешнем магнитном поле $\mathbf{H}$ равна

$$E_H = -(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) = -MN \cos \varphi, \quad (5.4)$$

где φ — угол между $\mathbf{M}$ и $\mathbf{H}$. При $\varphi = 0$ энергия будет наименьшей, поэтому момент ориентируется по $\mathbf{H}$.

Однако при термонамагничивании (при охлаждении образца от температуры T , близкой к точке Кюри T_C , до комнатной или более низких T) некоторых природных ферромагнетиков обнаружены случаи самообращения антипараллельной полю $\mathbf{H}$ ориентации суммарной термонамагниченности ТМ (и термоостаточной намагниченности TRM).

Впервые определенно эффект самообращения на природных ферромагнетиках был обнаружен японским геофизиком Т. Нагата при лабораторном термонамагничивании образца дацитовой породы горы Харуна. При ориентации намагниченности по полю $\mathbf{H}$ возникает термодинамически равновесное магнитное состояние ферромагнитного образца. Соответственно, образование в образце антипараллельной полю $\mathbf{H}$ (обратной) намагниченности следует рассматривать как возникновение неравновесного магнитного состояния («замороженная» обратная TRM).

Такое состояние может быть достигнуто в ферромагнетике из-за его сложного строения в процессе его термонамагничивания. Спонтанный магнитный момент $\mathbf{M}_S$ двухподрешеточного ферромагнетика изначально, по своей природе, состоит из двух антипараллельно направленных, не равных по величине моментов $\mathbf{M}_{A_S}$ и $\mathbf{M}_{B_S}$ магнитных подрешеток A и B :

$$\mathbf{M}_S = \mathbf{M}_{B_S} - \mathbf{M}_{A_S} \quad (5.5)$$

Поэтому, если $\mathbf{M}_{B_S} > \mathbf{M}_{A_S}$, то при ориентации суммарной $\mathbf{M}_S$ по направлению $\mathbf{H}$ значительная часть атомных магнитных моментов (рис. 5.1), сумма которых равна $\mathbf{M}_{A_S}$, будет ориентирована антипараллельно $\mathbf{H}$. Рассмотрим схему процесса термонамагничивания (рис. 5.2) в ферромагнетике без самообращения намагниченности (кривая 1) и в ферромагнетике, обладающим свойством самообращения (кривые 2 + 3, 2 + 4). Созданная при температуре, близкой к T_C «нормального» ферромагнетика, ориентация магнитных доменов по $\mathbf{H}$ закрепляется внешним магнитным полем $\mathbf{H}$ и возникающим в процессе охлаждения потенциальным рельефом ферромагнетика, создающим спектр локальных минимумов потенциальной энергии. При комнатной

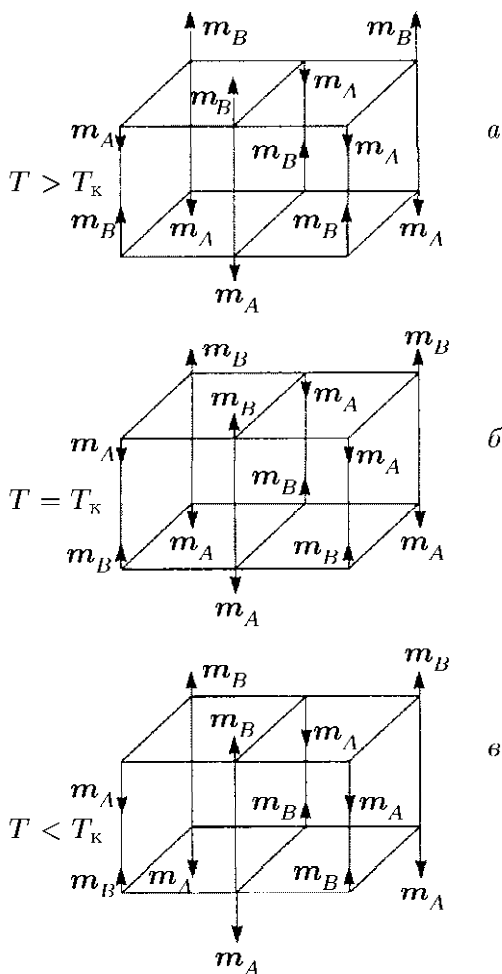


Рис. 5.1. Смена знака M_S ферримагнетика при изменении температуры от T_C до T_0 .

a) $T > T_K$: $m_B = 4\mu_B$, $m_A = 2\mu_B$,

$$M_S = M_{B_S} - M_{A_S} = 6 \cdot 4\mu_B - 6 \cdot 2\mu_B = 12\mu_B;$$

б) $T = T_K$: $m_B = m_A = 3\mu_B$,

$$M_S = M_{B_S} - M_{A_S} = 6 \cdot 3\mu_B - 6 \cdot 3\mu_B = 0;$$

в) $T < T_K$: $m_B = 2\mu_B$, $m_A = 4\mu_B$,

$$M_S = M_{B_S} - M_{A_S} = 6 \cdot 2\mu_B - 6 \cdot 4\mu_B = -12\mu_B$$

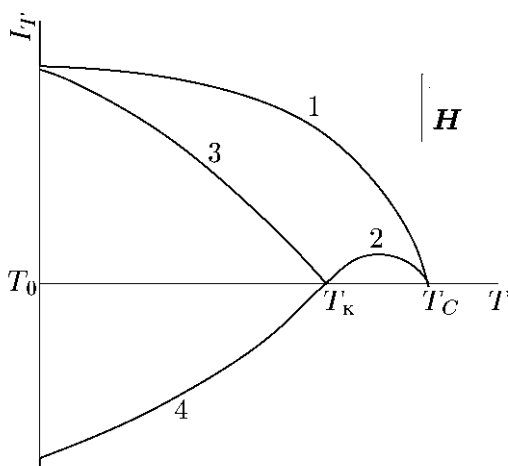


Рис. 5.2. Кривые намагничивания ферримагнетиков в случае отсутствия у ферримагнетика кривой N -типа (кривая 1) и в случае наличия кривой N -типа (кривые 2 + 3 и 2 + 4)

температуре T_0 образуется намагниченность ТМ, величина которой будет определяться степенью ориентации магнитных моментов доменов, по направлению $\mathbf{H}$ в зависимости от напряженности намагничивающего поля H (рис. 5.2, кривая 1). При полной ориентации всех магнитных моментов доменов в поле насыщения H_S возникает насыщение, и ТМ будет равна спонтанной намагниченности.

Ориентации и величины магнитных моментов M_{AS} , M_{BS} в подрешетках A и B определяются величинами обменных взаимодействий внутри подрешеток (энергии E_A и E_B) и между подрешетками (E_{AB}). Существенным является то, что все эти величины (M_{AS} , M_{BS} , E_A , E_B , E_{AB}) могут изменяться с изменением температуры. Изменения могут быть настолько существенными, что при охлаждении ферримагнетика от $T = T_C$ при некоторой температуре компенсации T_K в доменах ферримагнетика происходит смена знака M_S из-за того, что при $T > T_K$ пресвалировала намагниченность подрешеток B , а при $T < T_K$ намагниченность подрешеток A становится больше намагниченности подрешеток B . Это относится и к спонтанной намагниченности всего ферримагнитного образца. Возможность существования ферримагнетиков, у которых зависимости $I_S(T)$ имеют при некоторой $T = T_K$ величину $I_S(T_K) = 0$ (кривые N -типа), была теоретически установлена Неелем, а в дальнейшем многократно подтверждалась экспериментально.

При термонамагничивании «самообращающегося» ферри-магнетика в интервале температур $T_k < T < T_C$ будет возникать намагниченность ТМ, ориентированная по направлению $\mathbf{H}$, сначала по мере охлаждения увеличивающаяся, затем при приближении T к T_k уменьшающаяся в связи с уменьшением I_S ферримагнетика. При $T = T_k$ намагниченность $I = 0$ (рис. 5.2, кривая 2). При дальнейшем охлаждении ниже T_k могут встретиться два случая, зависящих от величины M_S доменов и от соотношения величин коэрцитивной силы H_c и внешнего поля H .

Если при $T < T_k$ поле $H > H_c$, то при дальнейшем охлаждении ниже T_k достаточно большое поле H будет разворачивать антипараллельные M_S доменов и намагниченность будет вновь увеличиваться по направлению $\mathbf{H}$ (рис. 5.2, кривые 2 + 3). А в случае, если поле $H < H_c$, то разворот доменов по полю $\mathbf{H}$ ввиду малости полевой энергии E_H будет невозможен и при $T < T_k$ за счет роста M_S , направленной по M_{AS} , будет увеличиваться ТМ в антипараллельном по отношению к $\mathbf{H}$ направлении (рис. 5.2, кривые 2 + 4).

Образовавшаяся «самообращенная» термоостаточная намагниченность будет находиться в неравновесном состоянии и будет удерживаться локальными энергетическими барьерами ферри-магнетика.

Аналогичное изменение на 180° направления в доменах может произойти и за счет диффузии магнитных ионов между подрешетками. Поэтому возможно самообращение намагниченности и в результате химических процессов в ферримагнитных минералах.

Существуют и другие представления о механизмах самообращения намагниченности в ферримагнитных минералах горных пород. Еще в 1954 г. М. А. Грабовский и А. Н. Пушков показали, что самообращение намагниченности возможно за счет магнитостатического взаимодействия между двумя соприкасающимися образцами минералов: магнетита и пирротина. Предполагается, что магнитостатическое взаимодействие возможно и в природных мелких ферримагнитных зернах, имеющих двухфазное строение. В ряде работ рассматривается возможность самообращения двухфазных минералов за счет обменного взаимодействия между различными фазами.

На наш взгляд, наиболее легко осуществимым и поэтому наиболее вероятным является самообращение, происходящее по первому из рассмотренных нами механизмов, а именно при термонамагничивании в достаточно слабых полях H ферримагнетиков,

имеющих точку компенсации T_K , в которой происходит изменение знака I_S в ферритмагнетике (рис. 5.2, кривые 2 + 4).

Несмотря на высказанные нами соображения о наиболее вероятном физическом механизме самообращения, мы считаем, что это явление очень сложное и к настоящему времени недостаточно изученное. Оно имеет прямое отношение к проблеме инверсий геомагнитного поля. Поэтому необходимо продолжать изучение самообращения намагниченности на различных типах континентальных и океанских горных пород.

Одним из авторов книги с коллегами в 1984 г. были исследованы эффекты самообращения намагниченности на природных пикроильменитах (аналоги гемильменитов), которые содержались в кимберлитах, образцы которых были отобраны из алмазодобываемых труб Якутии. При исследовании синтезированных гемильменитов, аналогичных пикроильменитам, было получено, что самообращение TRM проявлялось у образцов гемильменитов вполне определенного состава.

Явление самообращения намагниченности наблюдалось также на горных породах, содержащих титаномагнетиты или их аналоги. В последнее время особый интерес вызывает исследование самообращения TRM океанских базальтов, магнитные свойства которых определяются, в основном, однофазно и гетерофазно окисленными титаномагнетитами. В подводных базальтах было обнаружено, что обратная термоостаточная намагниченность возникает в результате лабораторного прогресса образца, когда его T_C поднимается до $\approx 350^\circ\text{C}$, т.е. на катиондефицитных титаномагнетитах определенного состава.

В образцах базальтов, драгированных с морского дна из трансформного разлома Романш (Центральная Атлантика) и из тройственного сочленения Буве в районе хребта Шписс (Южная Атлантика), было также найдено небольшое количество образцов со свойствами самообращения TRM.

Подводя итоги сказанному, следует отметить, что при исследовании образцов горных пород разного происхождения и содержащих различные ферритмагнитные минералы наблюдаются случаи самообращения термоостаточной намагниченности. Пока самообращающихся образцов найдено очень мало по сравнению с огромным количеством образцов, на которых получены основные палеомагнитные результаты и сделаны выводы о геомагнитных инверсиях, происходивших на протяжении последних 500 600 млн лет. Однако следует принимать во внимание, что самообращение NRM является еще одним механизмом

образования обратной намагниченности горных пород помимо инверсий ГМ поля.

Несмотря на экспериментально обнаруживаемые случаи самообращения намагниченности, существует большое число фактов, которые, хотя и косвенно, свидетельствуют в пользу возникновения обратной естественной остаточной намагниченности за счет инверсий геомагнитного поля, а не в результате самообращения намагниченности. Это такие факты, как приблизительно одинаковое число смен знака NRM, зафиксированное за определенное геологическое время на различных породах разных континентов и океанов. На дне океанов в ряде мест обнаружено одинаковое количество смен знака NRM на подводных базальтах и осадках за определенное время. Исследования процесса смены знака в горных породах, выполненные на осадочных породах различных материков, также дают почти идентичные картины. Поэтому объективно я, как автор этого раздела книги, также склонен отдать предпочтение инверсиям геомагнитного поля. Но тем не менее надо найти место и самообращениям намагниченности в общей магнитохронологической шкале. Надо доказать, что самообращения NRM не играют существенной роли в образовании намагнитенных пород. Собственно, в этом и заключается основная цель исследований явления самообращения и его физического механизма. Иначе будет до конца недоказанным и существование инверсий геомагнитного поля. Известный математик, академик Мальцев говорил: «Можно тысячу раз сказать “да” и ничего не доказать, а можно один раз сказать “нет”...»

Объективно в настоящее время из двух механизмов образования обратной NRM мы можем непосредственно наблюдать в лаборатории только один: самообращение. Если инверсии и происходят, то все равно никогда наблюдать их мы не сможем и не смогут наши потомки, так как время протекания процесса одной инверсии составляет несколько тысяч лет.

Рассмотренная проблема двух возможных механизмов образования обратной NRM (инверсии ГМ поля и самообращение намагниченности) показывает, насколько сложно установить истинную причину глобальных геофизических явлений, лабораторное и теоретическое моделирование которых далеко не всегда возможно. В таких случаях на первый план необходимо ставить систему твердо установленных фактов, характеризующих то или иное геофизическое явление. К сожалению, встречаются случаи, когда авторы гипотезы привлекают к ее обоснованию только те факты, которые подтверждают гипотезу и не рассматривают факты, не подтверждающие гипотезу.

Глава 6

Вода на Земле

Водная оболочка нашей планеты, в отличие от ее воздушной оболочки, является прерывистой, а не сплошной. Действительно, океаны отделены друг от друга материками или цепью островов, что приводит к ряду особенностей общей циркуляции вод Мирового океана по сравнению с атмосферой.

Нашу планету можно считать планетой воды, так как вода покрывает 75% земной поверхности. Это и ослепительно синие огромные океаны и моря, являющиеся составными частями Мирового океана, и нежно голубые озера и водохранилища, и многочисленные реки, серебристыми лентами пересекающие территорию всех континентов, и льды на суше и на море. В больших количествах вода содержится в земных недрах. Все водные объекты на поверхности Земли связаны между собой и образуют гидросферу. Каждый водный объект, будь то океан, море, озеро, искусственное водохранилище, река или болото можно уподобить сложному организму, в котором одновременно протекают многочисленные физические, химические и биологические процессы.

Изучением физических процессов в гидросфере Земли на физическом факультете МГУ занимается кафедра физики моря и вод суши [155, 101].

Следуя [7, 132, 44], рассмотрим физические процессы в гидросфере.

Что мы знаем о возникновении Мирового океана

Об образовании Мирового океана мы знаем пока что очень мало. Дело в том, что химический состав морской воды, который мог бы служить индикатором изменений, которые происходили в процессе возникновения и эволюции Мирового океана, впервые был исследован только в 1872–1876 гг. во время экспедиции британского парового корвета «Челленджер», совершившего первую океанографическую кругосветную экспедицию. Именно во время этой экспедиции были исследованы физические и химические свойства морской воды на различных горизонтах. До этого времени никаких систематических измерений в океане не проводилось. Поэтому все существующие предположения об истории

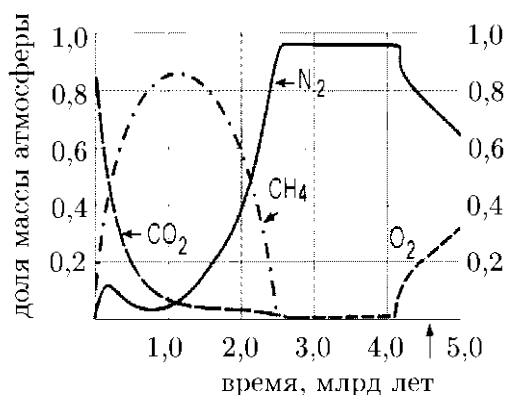


Рис. 6.1. Одна из моделей эволюции состава атмосферы Земли

происхождения морской воды целиком исходят из летописи геологических событий и расчета равновесия химических реакций.

Скорее всего, первоначальная гидросфера образовалась частично из первоначальной атмосферы и поэтому предположения о ранней истории морской воды сосредоточивались вокруг истории первоначальной атмосферы. Рис. 6.1 иллюстрирует одну из существующих моделей эволюции состава атмосферы Земли. Современное состояние атмосферы Земли обозначено стрелкой на временной шкале рисунка. Первоначальная же атмосфера Земли в период образования нашей планеты ($\sim 4,6$ млрд лет тому назад) скорее всего состояла из паров воды H_2O , углекислого газа CO_2 , метана CH_4 и соединений азота в виде аммиака NH_3 и гораздо больше напоминала тогда атмосферу Венеры. Кислород начал поступать в атмосферу на сравнительно позднем этапе развития планеты. Источником кислорода являлось расщепление молекул H_2O под действием УФ радиации Солнца и процесс фотосинтеза растительного покрова Земли. В настоящее время растения производят $\sim 10^{14}$ кг O_2 в год или $3 \cdot 10^6$ кг/с, что значительно больше, чем дает диссоциация молекул H_2O . Однако содержание кислорода в атмосфере не увеличивается — весь он расходуется на дыхание животных и человека, на окисление газов, выделяющихся из вулканов, на горение, на гниение мертвых растений. Поэтому такая деятельность человека, как интенсивная рубка лесов, может привести к уменьшению содержания O_2 в атмосфере, т.е. к экологической катастрофе. Отсюда понятен глубокий смысл выражения «леса — это легкие планеты».

Но вернемся к первичному океану. Образование первичного оксана началось тогда, когда в первичной атмосфере создались условия для конденсации водяного пара. Возникавший конденсат скапливался в замкнутых углублениях земной коры, и эти скопления положили начало образованию протооксанов. Так как в это время в атмосфере Земли было велико содержание CO_2 , этот газ вступал в реакцию со сконденсировавшейся водой и образовывал кислоту, которая поступала в первоначальный океан. Так что протооксаны, скорее всего, были очень кислыми. Поскольку выделение паров H_2O продолжалось, продолжался и процесс их конденсации, и в результате протоокеаны, имевшие вначале, может быть, и небольшие размеры, слились в океаны. Геологические данные свидетельствуют, что уже 3 млрд лет тому назад воды на Земле было достаточно. По мере развития жизни на Земле (органические соединения появились 2,5–3,0 млрд лет тому назад, зарождение жизни на Земле датируется 2,5–1,0 млрд лет тому назад) менялся и состав морской воды (уменьшалась ее кислотность). Образовавшийся озоновый экран защищал живые организмы от действия жесткого ультрафиолетового излучения. Окисление серы, аммиака до свободного азота обусловили образование современного типа азотно-кислородной атмосферы. Появление кислорода в результате фотосинтеза привело к интенсивному изменению химического состава воды океанов. Восстановительная форма существования элементов сменилась на окислительную. Стабилизация химического состава атмосферы обуславливала стабилизацию нового химического состава океанов. Примерно около 1 млрд лет тому назад морская вода достигла, вероятно, такого состава, который очень близок к составу современной морской воды.

Как упоминалось выше, об истории развития Мирового океана мы знаем очень мало. Существует ряд легенд о возникновении Атлантической впадины и впадины Тихого оксана. Первые гипотезы истории развития Атлантической впадины восходят, по крайней мере, к Платону. Известное единственное указание на местоположение и обстоятельства гибели Атлантиды было найдено в его архивах в 347 г. до н. э. Из них следовало, что само предание было завезено в Элладу далеким предком Платона, известным мудрецом Солоном, из Египта, где он путешествовал около десяти лет за 6 веков до н. э. Там-то служители богини Нейт и поведали Солону это странное сказание о погибшей за 9000 лет до этого цивилизации, частью которой и была Атлантида — остров, располагавшийся в Атлантическом океане «... перед проливом, который ... называется Геракловыми столбами».

Одно время считали, что Атлантида находилась и была затоплена в Средиземном море вблизи Мессинского пролива, разделяющего юг Италии и остров Сицилию. Однако наиболее признанной все еще является гипотеза Платона. Если придерживаться этой гипотезы, то Атлантида была большим, расположенным к западу от Гибралтара, архипелагом, который затонул в 9600 г. до н.э. Эта дата является весьма важной в геологическом масштабе, так как она совпадает с периодом, когда племена, жившие на островах и побережье, были вынуждены искать другие земли, что может свидетельствовать об опасности затопления.

Одна из концепций возникновения Атлантической впадины связана с гипотезой дрейфа материков. Именно Джордж Дарвин — сын Чарльза Дарвина — выдвинул эту теорию, хотя она более известна как теория Вегенера. Дж. Дарвин разработал методы предвычисления приливов, основанные на применении гармонического анализа, исследовал влияние приливов в качестве космогонических факторов, т.е. факторов, сказывающихся на эволюции небесных тел. Дж. Дарвином была выдвинута теория приливного резонанса, согласно которой утверждалось, что Луна отделилась от Земли и в результате этого на Земле остался «шрам» в виде ложа Тихого океана. Отделение от Земли такой большой массы вызвало напряжение в коре земного шара. Следствием этих напряжений и явился дрейф материков. При этом Атлантический океан — результат растяжения, и дно его — обнаженный шрам базальтовой коры, от которого двигались материки, а Тихий океан — зона сжатия. Веским доводом в пользу гипотезы дрейфа является сходство побережий, особенно в южной части Атлантического океана. Если Южную Америку придвинуть к западному побережью Африки, Аравийский полуостров и Индию — к восточному (туда же и Мадагаскар), а Австралию и Новую Зеландию — к новой береговой черте, то видно, что они хорошо подходят друг к другу.

Если Дж. Дарвин считал, что Луна откололась от Земли в силу приливного резонанса, то другая гипотеза предполагает, что откол Луны от Земли произошел в результате столкновения Земли с некоторым космическим телом, что и привело к отделению Луны в самостоятельный небесный объект. Американский космический аппарат «Клементина» сделал глобальную съемку обеих сторон Луны и исследовал лунный грунт. Исследования показали, что грунт Луны по своему химическому составу сильно отличается от земного. Этот факт опровергает сразу две гипотезы: 1) о том, что Земля и Луна одновременно возникли из газопылевого облака и 2) о том, что Луна возникла из мантии Земли,

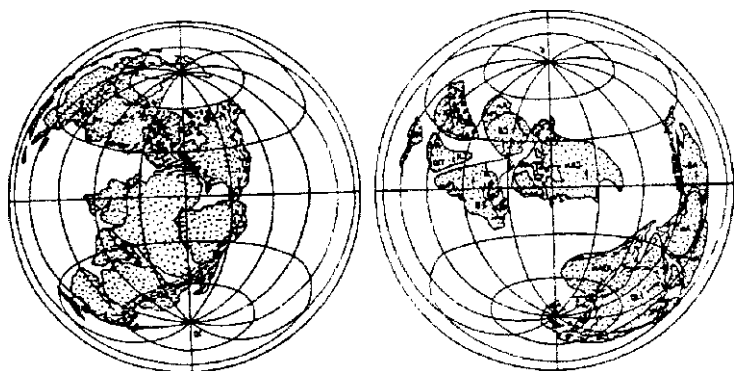


Рис. 6.2. Так выглядела наша планета в далеком прошлом

отколовшись от Земли во время ее столкновения с большим метеоритом размером с Марс. Вместе с тем, спектральный анализ 93% лунной поверхности подтверждает гипотезу гигантского столкновения, но произошло это столкновение между Землей и Луной, которая была самостоятельным небесным телом. Потеряв при столкновении часть энергии, Луна отскочила от Земли, но преодолеть ее притяжение не смогла и осталась спутником Земли. Результатом такого столкновения вполне могла быть впадина на поверхности Земли, в которой и образовался Тихий океан. Необходимо сказать, что Луна сыграла большую роль в эволюции Земли. Ее приливная энергия ускорила эволюцию нашей планеты примерно на 2–2,5 млрд лет (раньше Луна была ближе к Земле). Если бы не она, то Земля сейчас была бы в такой же фазе развития, как Венера.

Говоря об истории возникновения Мирового океана, следует вспомнить еще одну гипотезу. Согласно этой гипотезе примерно более 220–250 млн лет тому назад был единый материк Пангея (рис. 6.2). Затем он раскололся на два: Гондвану и Лавразию. Гондвана, в свою очередь, раскололась примерно 120 млн лет тому назад: Южная Америка «отъехала» от Африки, Евразия — от Америки и Африки. Лавразия раскололась еще ранее, около 180 млн лет тому назад. Австралия отошла от Антарктиды и сейчас она плывет к северу («въезжает» в Азию). Индостан 130 млн лет тому назад был вместе с Антарктидой, а затем откололся и «въехал» в Азию (в результате этого процесса возникли Гималаи и Памир, 40 млн лет происходит торошение континентальной литосферы Индостана и Азии). Африка сейчас

разламывается: 10–15 млн лет тому назад она с Аравией составляла одно целое, затем Аравия откололась. Северная Америка раскалывается в одном месте («отъезжает» Калифорнийский полуостров) и сжимается в другом (идет сжатие и подвижка района Аппалачей). В Южной Америке зажаты Анды — их подпирает Тихоокеанская плита с одной и континент — с другой стороны.

Движутся литосферные плиты, основания которых уходят в глубь Земли, а континенты плывут на них, как на плотах. Скорость движения 2–3 см в год. За 2 млн лет материка совершили путь в 100 км. При расколе Гондваны и Лавразии материка отошли друг от друга, а в пространстве между ними образовались Атлантический и Индийский океаны.

История развития Мирового океана не окончена. Если континенты движутся, то как будут выглядеть составляющие Мирового океана в далеком будущем, точно предсказать пока невозможно. Примером развития Мирового океана может служить тот факт, что южная часть острова Гавайи ежегодно сползает в море на несколько дюймов. В какой-то мере объяснением этому может служить вулкан Килауэа. Когда остров обломится, предсказать ученые не могут, но очевидно, что это будет экологическая катастрофа.

Таким образом, про историю развития Мирового океана мы знаем мало. А есть ли океаны на других планетах? Чтобы ответить на этот вопрос, попытаемся определить, что такое океан и каковы условия его существования?

Есть ли океаны на других планетах

Океан — это значительный слой жидкости на поверхности планеты, резкой границей отделенный от ее атмосферы. Что необходимо, чтобы на планете существовал океан?

- Температура хотя бы на части планеты должна быть выше температуры плавления того вещества, из которого состоит океан (на Земле — это вода). Но этого недостаточно, так как если этого вещества мало, то оно все может оказаться в газообразном состоянии.
- Парциальное давление какого-либо газа около поверхности планеты должно быть выше давления этого газа в насыщенном состоянии (тогда будет конденсация и образование жидкой фазы).

- Температура и давление должны быть ниже критической точки, так как при температуре и давлении, больших критических, нет разницы между фазами — они непрерывно переходят друг в друга.

Из всех небесных тел солнечной системы претендентом на наличие океана является только спутник Сатурна Титан. У Титана есть атмосфера, основным газом в которой, как и на Земле, является азот. Кроме азота в атмосфере Титана есть метан и другие углеводороды. Если бы к атмосфере Титана добавить еще ~15% кислорода, то ей не было бы цены. Но океан на Титане — метановый. Именно для этого вещества выполняются все три условия, необходимые для существования океана:

- 1) температура поверхности ($T_s = 93$ К) выше температуры плавления T_l метана CH_4 ($T_l = 90$ К);
- 2) парциальное давление метана около поверхности планеты выше давления этого газа в насыщенном состоянии;
- 3) температура поверхности ниже температуры критической точки CH_4 , равной 191 К.

Атмосферы есть у Венеры, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна. Слабая атмосфера есть у Марса. Океан же только на Земле (вода) и у Титана (метановый). На Венере и Марсе в атмосфере преобладает углекислый газ CO_2 , на больших планетах — гелий (He), водород (H), метан (CH_4).

Общие сведения о Мировом океане

Как отмечено выше, водная оболочка Земли в отличие от воздушной оболочки (атмосферы), не сплошная, она разорвана континентами. В настоящее время Мировой океан делится на четыре океана: Атлантический, Индийский, Тихий и Северный Ледовитый. Общая площадь поверхности Мирового океана составляет $361 \cdot 10^6$ км², т. е. 70,8% площади поверхности Земли. На Тихий океан приходится 49,5%, на Атлантический — 25,3%, на Индийский — 21,1%, на Северный Ледовитый — 4,1%. Воды каждого океана, вдаваясь в глубь суши, образуют моря, режим которых определяется условиями как открытого океана, так и материка. В зависимости от положения и связи с океаном выделяют окраинные, средиземные и внутренние моря. Границы окраинных морей — выступы материков, гряды островов, а иногда и полуострова. Эти моря прямо переходят в океан, и

физические процессы в них, за исключением прибрежной зоны, более подвержены влиянию открытого океана, чем материка. Средиземные моря — части океана, глубоко вторгающиеся в сушу и соединенные с океаном одним или несколькими проливами. Они могут быть внутриматериковыми, как Черное море, например, или межматериковыми (Средиземное море). Режим вод таких морей больше подвержен влиянию материков, чем открытого океана. Внутренние моря полностью изолированы от океана (Каспийское море). По характеру своего режима они ближе к водосам суши, и только высокая степень минерализации вод указывает на их океанское происхождение.

Рельеф дна Мирового океана не однороден и геология океанского дна существенно отличается от геологии континентов. На дне каждого океана расположены горные хребты, получившие название срединно-океанских. Наиболее протяженный Срединно-Атлантический хребет, который тянется от Исландии на юг параллельно береговым линиям Африки и Америки и затем поворачивает на восток, выходя в Индийский океан. Меньшие по размерам хребты есть в Индийском и Тихом океанах. Полная протяженность хребтов около 80 000 км. Вдоль хребтов располагаются центры подводных землетрясений.

Средние глубины океана значительно превосходят средние высоты суши. Средняя глубина Мирового океана составляет 3800 м. Наглядное представление о распределении земного рельефа даст гипсографическая кривая. Если по оси ординат откладывать высоту или глубину относительно уровня моря, а по оси абсцисс — процент площади Земли в соответствующем диапазоне высот или глубин, то мы получим гипсографическую кривую (рис. 6.3).

Выделяют следующие основные крупномасштабные формы рельефа океанского дна:

Шельф (материковая отмель) — примыкающая к суше мелководная и пологая часть океанского дна, в геологическом отношении являющаяся продолжением материка. Внешней границей шельфа принято считать изобату 200 м, ширина шельфа весьма разнообразна, в Сибири ширина шельфа достигает 800 км. Средний уклон дна шельфа $2 \cdot 10^{-3}$. Шельф по площади составляет 7% общей площади Мирового океана, однако роль его в жизни человека весьма велика. Термические и динамические процессы на шельфе имеют целый ряд особенностей по сравнению с аналогичными процессами в открытых районах океанов и морей: на шельфе меняется режим волнения, возникает вдольбереговая

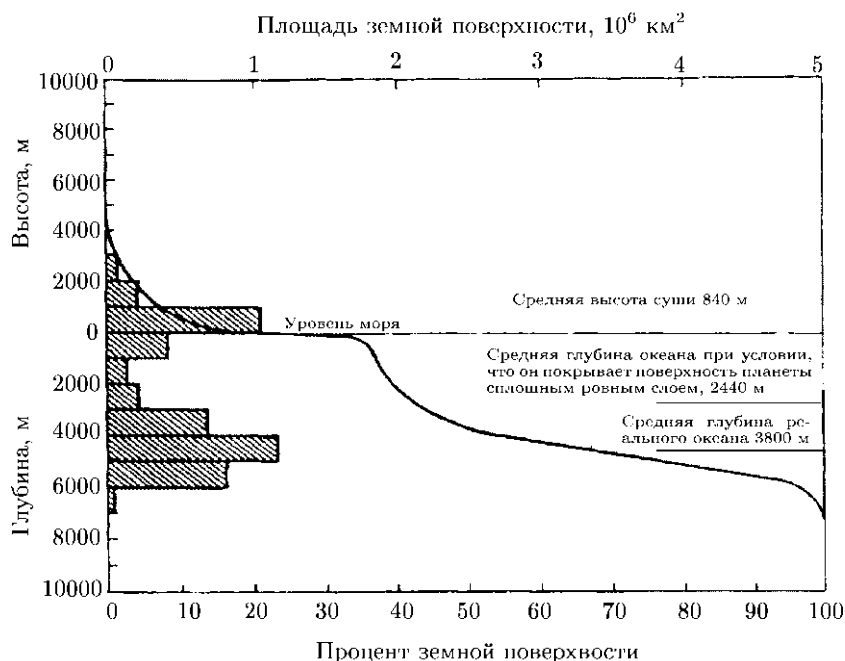


Рис. 6.3. Гипсографическая кривая и гистограмма высот и глубин от уровня моря, построенные через 1000-метровые интервалы

циркуляция, четко проявляются стонно-нагонные явления. Области апвеллинга и даунвеллинга также тяготеют к шельфовым районам. Несмотря на большую доступность для исследователей (легче организовать и проводить наблюдения) физические процессы на шельфе изучены в значительно меньшей степени, чем в открытых районах морей и океанов.

Если углубляться в сторону открытого моря, то за шельфом идет **материковый склон**, затем **материковое подножие**, которые вместе образуют переходную область от материков к ложу океана. Материковый склон — наиболее круто наклоненная часть дна, уклон которой составляет 10^{-2} , но в некоторых местах он достигает и 10^{-1} . Внешняя граница материкового склона изобата 3000 м. У материкового подножия наклон дна на порядок меньше, чем в области материкового склона. Внешняя граница материкового подножия располагается в основном между изобатами 3000 и 4000 м.

Ложе океанов занимает 50% всей площади Мирового океана. Здесь наблюдаются отдельные поднятия дна с плоскими

вершинами, иногда до глубин 2000 м, и, как сказано выше, целые горные системы, простирающиеся через все океаны в меридиональном и зональном направлениях. Срединно-океанские хребты делят ложе на котловины — обширные океанические понижения дна с малыми уклонами и глубинами до 5000–6000 м с достаточно ровным рельефом. Хребты влияют на характер горизонтальной циркуляции вод Мирового океана, а следовательно, и на перенос тепла из одних районов в другие. В ложе оксанов наблюдаются глубоководные впадины с глубинами больше 6000 м. Таких впадин всего около 100, на их долю приходится $\sim 1\%$ всей площади Мирового океана. Глубоководные впадины являются очагами частых и наиболее близких к поверхности дна землетрясений, обуславливающих возникновение волн цунами.

Вода на Земле

Выше уже было сказано, что все водные объекты на Земле связаны между собой и образуют гидросферу нашей планеты. В природе происходит сложный обмен влагой между водными объектами, сопровождающийся фазовыми переходами, но общее количество воды при этом не изменяется. На Земле вода может существовать в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Оценки показывают, что уменьшение или увеличение расстояния от Солнца до Земли на 10% сделало бы реализацию трех агрегатных состояний воды на Земле невозможным.

Мировой запас воды составляет около $1,46 \cdot 10^9$ км³. Общий запас пресной воды составляет $3,5 \cdot 10^7$ км³. По основным водным объектам вода распределена следующим образом (тыс. км³):

океаны и моря	1370323
подземные воды	59000
материковые льды	26000
полярные льды	3500
снежный покров	250
озера	250
реки и водохранилища	50
болота	6
вода в организмах	1
вода в атмосфере	13

Вода является одним из важнейших факторов, которые формируют климат нашей планеты. Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода (H_2O). Вследствие особенностей структуры молекул воды и межмолекулярных взаимодействий вода обладает физическими свойствами, которые являются аномальными по сравнению с другими жидкостями. Так, при замерзании объем воды увеличивается, а не уменьшается, как у других жидкостей. Благодаря этому лед не опускается на дно, и водоемы не промерзают до дна. Вода характеризуется аномальной зависимостью плотности от температуры — максимальную плотность она имеет при 4°C (рис. 6.4). Температура

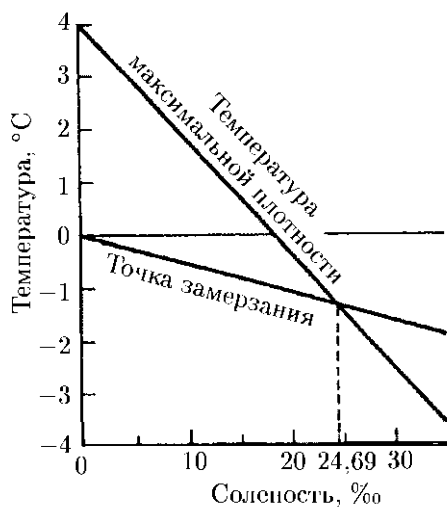


Рис. 6.4. Зависимость температуры замерзания воды от солености

замерзания воды изменяется от 0°C для пресной воды до $-1,9^\circ\text{C}$ у океанской воды. Температура максимальной плотности также убывает с увеличением солености от максимального значения 4°C для пресной воды. Вода имеет самую высокую теплоемкость (за исключением водорода и аммиака), что способствует сглаживанию температурных градиентов в атмосфере. Вследствие высокой теплоемкости воды до 30% солнечной энергии расходуется на ее испарение, а это приводит к стабилизации температуры на Земле. Вода обладает низкой сжимаемостью. Высокое значение поверхностного натяжения воды позволяет воде подниматься по капиллярам на несколько метров и играет важную роль в образовании капель.

Будучи прекрасным растворителем, вода содержит растворенные соли, газы, органические вещества, содержание которых в воде может меняться в широком диапазоне. Если концентрация солей меньше 1 г/кг, вода считается пресной, при концентрации солей до 25 г/кг — солоноватой, а при большей концентрации — соленой. В океане концентрация солей составляет около 35 г/кг, в пресных озерах, реках 5–1000 мг/кг. Морская вода является многокомпонентной системой, включающей в себя молекулы воды, анионы и катионы солей, а также множество примесей. Хорошее перемешивание морских вод ведет к выравниванию содержания солевых компонентов в разных частях Мирового океана, и поэтому можно говорить о постоянстве солевого состава океанических вод. Для характеристики солености используется величина S — соленость, определяющая в граммах массу растворенного твердого вещества, содержащегося в 1 кг морской воды при условии, что бром и йод заменены эквивалентным содержанием хлора, все углекислые соли переведены в оксиды, все органические вещества сожжены при температуре 480 °С. Такое определение солености восходит к принятому ранее определению солености по хлорности путем титрования морской воды. Измеряется соленость в тысячных долях — промилле (‰). Постоянство солевого состава морской воды позволяет определять соленость по содержанию одного компонента.

Определение солености по содержанию в ней анионов хлора проводится по формуле Кнудсена:

$$S \text{ ‰} = (0,030 + 1,8050 \text{ Cl}) \text{ ‰}$$

или формуле ЮНЕСКО

$$S \text{ ‰} = 1,80655 \text{ Cl ‰}.$$

В этих формулах содержание хлора определяется числом граммов серебра, необходимым для осаждения всех галогенов, содержащихся в определенном объеме морской воды (около 0,33 кг). В настоящее время определение солености проводят на основе измерения электропроводности морской воды.

Основными составляющими гидрологического цикла на Земле являются: испарение, осадки, перенос влаги воздухом, речной сток. Годовой влагооборот выглядит следующим образом (тыс. км³):

испарение с поверхности океана	448
испарение с поверхности суши	72
осадки на поверхность океана	411
осадки на поверхность суши	109.

На поверхность суши осадков выпадает больше, чем с нее испаряется. Избыток влаги в виде речного стока поступает в океан. Важную роль в испарении воды на суше играют растения — именно транспирация растений увеличивает водооборот по сравнению с безжизненной сушей. Суммарная площадь поверхности листьев растений в среднем в 4 раза превосходит поверхность суши. Это обеспечивает превышение транспирации над испарением с суши. При отсутствии растительного покрова флуктуации океанических осадков на суше приводили бы к резким колебаниям речного стока. Только биота суши (термин биота активно используется в экологии и объединяет два понятия: флору и фауну) ежегодно производит около 600 Гт органического вещества, из них 90% приходится на воду. Биота ежегодно связывает 540 км^3 воды. В процессе создания этой массы органического вещества растительность использует в 100 раз больше воды — около $54\,000 \text{ км}^3$, которые испаряются растительностью в атмосферу. Таким образом, годовое испарение растений суши значительно превосходит речной сток планеты. Биота контролирует до 70% круговорота воды на суше.

Гидрологический цикл играет важнейшую роль в формировании климата на Земле. В настоящее время все водные объекты подвержены антропогенному воздействию, причем в наибольшей степени это относится к водам суши и внутренним морям. Такие объекты как бассейн реки Волги, Каспийское, Черное, Балтийское и Средиземное моря являются зонами экологического бедствия, прежде всего вследствие антропогенного воздействия на гидрологический цикл регионов.

В океанологии чрезвычайно важным является понятие водной массы. Под водными массами понимаются большие, соизмеримые с размерами океана (моря) объемы воды, длительное время сохраняющие относительную однородность основных физических, химических и биологических характеристик, сформированных в определенных географических районах океана [47, 77]. В качестве основных характеристик водных масс используются соленость и температура, в качестве дополнительных характеристик применяются содержание газов,

щелочность, оптические свойства, гидробиологические показатели. Квазипостоянство характеристик является основным отличительным свойством водных масс. Водная масса отражает основные физические, химические и биологические черты района формирования водной массы. Для выделения водных масс используются различные методы, наибольшее распространение получил метод T - S -кривых, или метод T - S -диаграмм. Метод основан на том, что значения температуры и солёности водных масс одного происхождения согласовано располагаются на T - S -диаграмме.

Различные водные массы разделяются фронтальными зонами или фронтальными поверхностями, в которых происходит обострение градиентов характеристик водных масс [135]. Квазистационарные климатические фронтальные зоны являются естественными границами основных водных масс в океане. В открытом океане выделяют пять типов фронтов: экваториальный, субэкваториальный, тропический, субполярный, полярный. Фронтальные зоны выделяются высокой динамичностью процессов, протекающих в них. В прибрежной зоне, в устьевой зоне формируются фронты, разделяющие шельфовые или стоковые воды от вод глубоководной части. Например, барьерная зона между водами Балтийского моря и водами Висленской губы (формируемыми за счёт стока реки Преголи) включает в себя стоковые, эстуарные и интрузионные фронты [152]. Формирование того или иного типа фронта зависит от внешних условий. По данным подповерхностных буксировок зондов температуры и солёности (измерения проводились на глубине 30 см) при ширине фронта около 70 м градиенты солёности и температуры составляют соответственно 2,2 ‰ и 1,1° на 10 м. Стоковый фронт с линзой распреснённых вод формируется при натекании пресных речных вод поверх солёных и плотных морских вод. В случае залива балтийских вод в лагуну образуется фронт интрузии тяжёлых морских вод в более лёгкие воды лагуны. При распространении клина солёных морских вод вдоль глубоководного морского канала наблюдается типичный эстуарный фронт. Типичное изменение температуры, солёности и плотности при пересечении фронта показано на рис. 6.5 [152].

На морской поверхности фронты часто проявляются скоплением загрязнений, водорослей, пены, свойствами поверхностных волн, отличных от волн вне фронта. На рис. 6.6 приведена фотография поверхностного проявления стокового фронта в устье

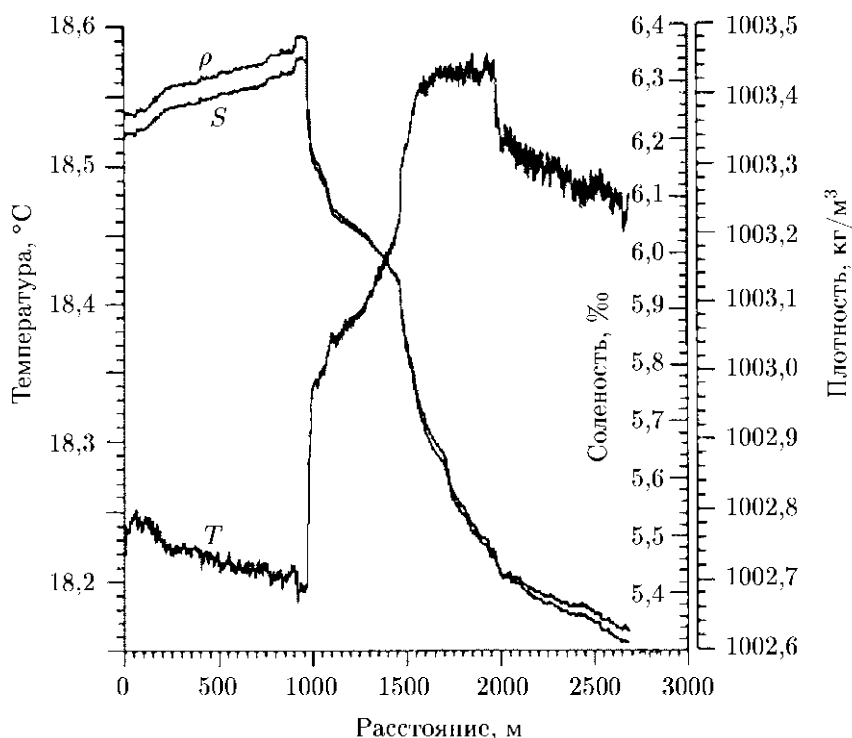


Рис. 6.5. Типичное изменение температуры T , солёности S , плотности ρ при пересечении фронта. Глубина буксировки 8 м

реки Кемь (Белое море, 2003). Поверхностные проявления фронтальных поверхностей надёжно идентифицируются различными дистанционными методами, в том числе спутниковыми.

Важной характеристикой вод Мирового океана является наличие масс воды, выделяющихся особыми свойствами, распространяющихся из области формирования на значительные расстояния и сохраняющих при этом свои особенности. Например, Антарктическая промежуточная вода формируется вдоль всего Антарктического кольца в зоне от 45° до 65° ю. ш. и является относительно малосолёной (от 34,0 до 34,8 ‰). На глубинах 500–1500 м Антарктическая промежуточная вода распространяется к северу в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах. В Атлантическом океане она пересекает экватор и достигает 20° с. ш. В тропической зоне происходит постепенное смешение тёплой



Рис. 6.6. Стоковый фронт в устье реки Кемь (Белое море, 2003)

соленой воды и холодной распресненной Антарктической промежуточной воды. Антарктическая донная вода, формирующаяся в море Уэдделла у берегов Антарктиды, распространяясь вдоль Срединно-Атлантического хребта, достигает 40° с. ш.

Смешение теплой соленой воды и холодной распресненной воды имеет важную особенность. Выравнивание температур происходит в 100 раз быстрее, чем выравнивание солености. Поэтому, если над холодной пресной водой находится слой соленой теплой воды, возникает неустойчивость, приводящая к образованию опускающихся соленых струй, называемых солевыми пальцами. Пусть возникает прогиб поверхности раздела. В этом прогибе соленая вода остывает быстрее, но не успевает при этом перемешаться с окружающей более пресной водой. Масса воды в прогибе становится плотнее окружающей жидкости и начинает опускаться, вытягивая за собой узкую струю более соленой воды, чем окружающая жидкость. Образование солевых пальцев значительно ускоряет перемешивание водных масс.

В Тихом океане к северу от субполярного фронта формируется Северо-Тихоокеанская промежуточная вода с соленостью от 33,6 до 34,6 ‰, которая затем на глубинах 500–1500 м распространяется к югу.

Средиземноморская промежуточная вода, формирующаяся в глубинах Средиземного моря за счет эффектов летнего осолонения и зимнего охлаждения, имеет соленость 38‰. Она проникает в Атлантический океан через глубоководную часть Гибралтарского пролива. Несмотря на сравнительно небольшое значение расхода, вода распространяется в Атлантическом океане на огромные расстояния. В настоящее время широко используется несколько различных классификаций водных масс. В отечественной океанологии наиболее широко применяется классификация Степанова [77].

Температура воды в океане определяется, в основном, поглощением солнечной радиации и испарением. Океанские течения, турбулентное перемешивание обеспечивают перераспределение тепла по всему океану. Вода Мирового океана достаточно холодная, она прогревается только на самой поверхности. Средняя температура воды в Мировом океане равна $3,8^\circ\text{C}$. Минимальные температуры воды наблюдаются в полярных областях, а максимальные — в тропической зоне и субтропической зоне. Представление о распределении водных масс океана по температуре дают рис. 6.7, 6.8 [44]. Толщина верхнего квазигомогенного слоя составляет 50–100 м. Величина перепада температур в сезонном термоклине достигает $10\text{--}15^\circ\text{C}$.

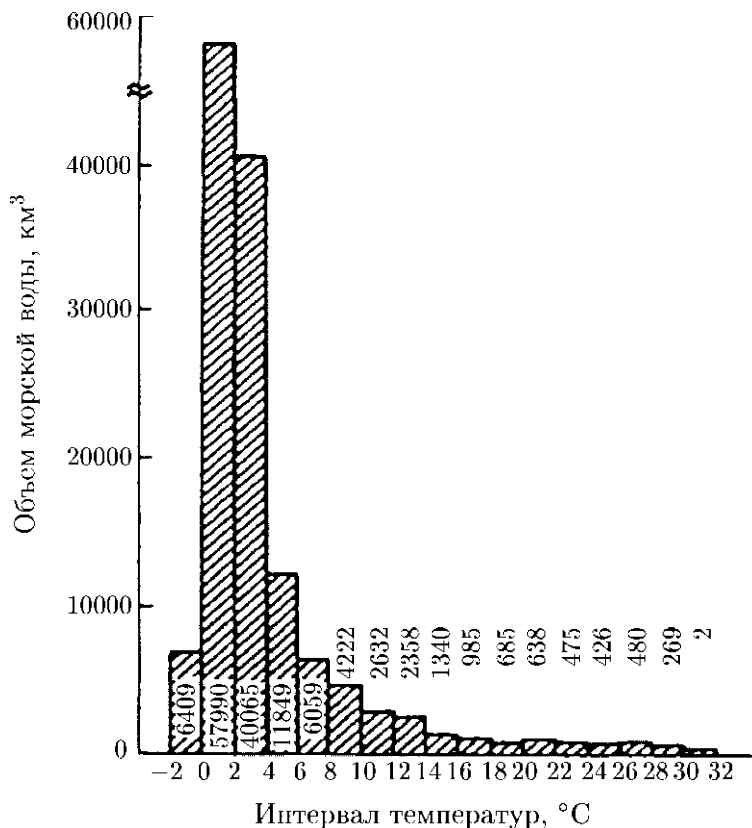


Рис. 6.7. Распределение температуры вод в Мировом океане. Температура примерно 75% вод океана колеблется в пределах от 0° до 4°С

Состав морской воды

Ранее уже было сказано, что современный состав морской воды, скорее всего, сформировался примерно 1 млрд лет тому назад. В настоящее время морская вода состоит на 96,5% из воды H_2O^{16} и 3,5% примесей. Молекула воды содержит 1 атом кислорода и 2 атома водорода. Сейчас известны изотопы водорода H^1 , H^2 , H^3 , H^5 , кислорода O^{15} , O^{16} , O^{17} , O^{18} , O^{19} и некоторые другие, которые, как и изотопы O^{15} , O^{19} и H^5 , были получены только в лаборатории, а в природе не встречаются. Тритиевой воды, т. е. воды, молекула которой содержит тритий, в природной воде ничтожно мало — 800 г на весь Мировой океан. В природе встречаются 9 различных видов молекул воды — это окислы обычного водорода H^1 и его изотопа дейтерия H^2 (табл. 6.1).

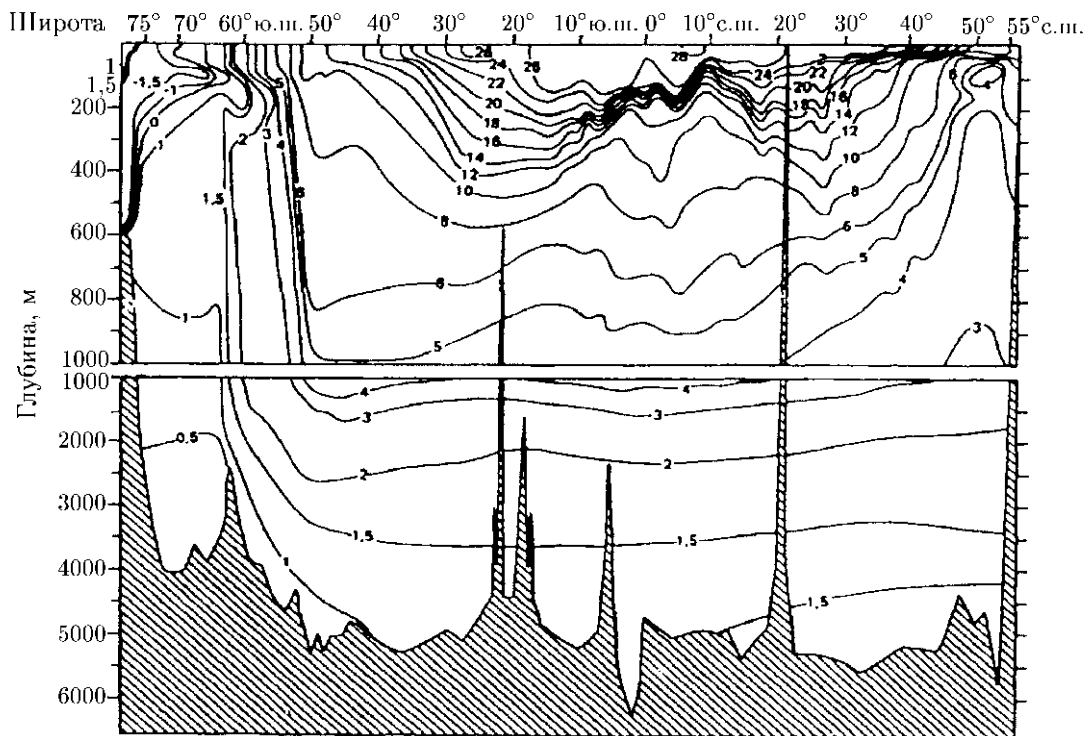


Рис. 6.8. Распределение средней годовой температуры в Тихом океане. В первом приближении океан выглядит равномерно холодным. Исключение составляет только тонкий поверхностный слой воды

Таблица 6.1

Молекулы воды	Содержание, %	Молекулы воды	Содержание, %
H_2^{16}O	99,73	$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{17}$	$1 \cdot 10^{-5}$
H_2^{18}O	0,20	H_2^{16}O	$3 \cdot 10^{-6}$
H_2^{17}O	$4 \cdot 10^{-2}$	H_2^{18}O	$6 \cdot 10^{-9}$
$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{16}$	$2 \cdot 10^{-2}$	H_2^{17}O	$1 \cdot 10^{-9}$
$\text{H}^1\text{H}^2\text{O}^{18}$	$6 \cdot 10^{-5}$		

Обычная вода — H_2^{16}O . Смесь остальных окислов — тяжелая вода. Довольно часто этот термин употребляется в более узком смысле, относясь только к окиси дейтерия, образованной обычным кислородом — H_2^{16}O , свойства которой наиболее сильно отличаются от свойств обычной воды. Тяжелая вода угнетающе действует на живые организмы и в больших дозах вызывает их гибель. Тяжелая вода является хорошим замедлителем нейтронов и теплоносителем для ядерных реакторов. Содержание ее невелико: на 6800 молекул обычной воды H_2^{16}O приходится 1 молекула воды H_2^{18}O .

Как уже говорилось, морская вода является многокомпонентной системой, включающей в себя молекулы воды, анионы и катионы солей, а также множество примесей. Общая масса растворенных солей в Мировом океане составляет огромную величину — $49,2 \cdot 10^{18}$ кг. Если распределить все морские соли по поверхности суши, то получится слой толщиной 150 м! В морской воде растворены практически все химические элементы периодической системы Менделеева, однако на долю 11 элементов, называемых главными компонентами, приходится более 99,9993% растворенных химических элементов.

Основные солевые компоненты морской воды приведены в табл. 6.2.

Постоянство солевого состава является замечательным свойством океанических вод, оно проявляется в стабильности соотношения между компонентами морской воды для различных регионов Мирового океана. Состав морской воды близок к составу крови человека, в этом можно увидеть одно из подтверждений первичного возникновения жизни в океане. Из табл. 6.2 видно, что 85% растворенных в морской воде минеральных солей составляют натрий и хлор. Именно эти элементы в виде поваренной соли и получают из морской воды

Таблица 6.2

Катионы	‰ содер- жания	‰ солевого состава	Анионы	‰ содер- жания	‰ солевого состава
Натрий Na^+	10,752	30,61	Хлор Cl^-	19,345	55,04
Калий K^+	0,39	1,10	Бром Br^-	0,066	0,19
Магний Mg^{++}	1,295	3,69	Фтор F^-	0,0013	0,004
Кальций Ca^{++}	0,416	1,16	Сульфат SO_4^-	2,701	7,68
Стронций Sr^{++}	0,013	0,04	Борная кислота H_3BO_3	0,027	0,07
			Бикар- бонат HCO_3^-	0,145	0,41

промышленным способом. Кроме NaCl промышленным способом из морской воды получают также бром, магний и его соединения. Бром почти чисто морской продукт, 99% его содержится в океане.

Что касается растворенных газов, то в океанских водах углекислого газа содержится в 100 раз больше, а кислорода почти в 100 раз меньше, чем в атмосфере. Масса растворенных в морской воде основных газовых составляющих (N_2 , O_2 , CO_2 , Ar) равна $32,4 \cdot 10^{12}$ т. Кислород поступает в результате фотосинтеза и вследствие поглощения из атмосферы при подсыщении воды кислородом. Нсорганический углерод содержится в морской воде в виде растворенного CO_2 , угольной кислоты, карбонатных и бикарбонатных ионов. Все эти углеродные соединения образуют сложную карбонатную систему. Азота в океане очень мало. Так как молекулярный азот инертен, его содержание в морской воде практически неизменно.

Плотность морской воды

Плотность морской воды определяется, главным образом, тремя величинами: температурой T , соленостью S и

давлением P , т. е.

$$\rho_w = \rho(T, S, P).$$

В дифференциальной форме зависимость плотности от температуры, солёности и давления имеет следующий вид:

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{SP} dT + \left(\frac{\partial \rho}{\partial S}\right)_{TP} dS + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_{TS} dP.$$

Использование этого выражения затруднительно, поскольку отсутствуют аналитические выражения для коэффициентов термического расширения:

$$k_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{SP},$$

солёностного сжатия:

$$k_S = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S}\right)_{TP}$$

и коэффициента изотермической сжимаемости:

$$k_P = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_{TS}$$

во всем диапазоне изменения T , S , P в Мировом океане.

В отличие от атмосферы для морской воды до настоящего времени нет аналитического выражения уравнения состояния. Широко используются различные эмпирические зависимости, из которых наиболее простой является линейная, получаемая при условии неизменности коэффициентов k_T , k_S , k_P . Основные выражения для плотности морской воды приведены, например, в [43]. Эмпирические зависимости содержат до 50 эмпирических коэффициентов и ни в коей мере не могут претендовать на универсальность, т. е. на ранг закона, каким является уравнение состояния для воздуха. Можно сказать, что зависимость плотности от давления адекватна зависимости от глубины — при погружении на 1 м давление увеличивается на 1 дбар.

Для ряда расчетов в океанологии широко используется потенциальная плотность

$$\rho_\Theta = \rho(\Theta, S),$$

определяемая как функция потенциальной температуры Θ и солёности S . При адиабатическом перемещении водной массы по вертикали ее температура изменяется. Температура водной

массы, приведенной адиабатически к давлению на поверхности оксана, называется потенциальной температурой.

Плотность морской воды в различных районах океана меняется незначительно, поэтому для практических целей используется понятие условной плотности или аномалии плотности:

$$\sigma = [\rho(T, S, P) - 1000] \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Если плотность морской воды неизменна, то океан называется **однородным**. Если вертикальное распределение плотности зависит только от давления, то говорят о **баротропном** океане. В случае, если плотность морской воды определяется температурой, соленостью и давлением, то океан считается **бароклинным**.

Зависимость плотности морской воды от солености и температуры имеет нелинейный характер, это обуславливает интересные свойства морской воды. В частности, при смешении водных масс имеет место эффект уплотнения. Например, если смешать два равных объема вод Гольфстрима (соленость $S = 35,56\%$, температура $T = 30^\circ\text{C}$, условная плотность $\sigma = 22,02$) и Лабрадорского течения (соленость $S = 27,38\%$, температура $T' = -1,5^\circ\text{C}$, условная плотность $\sigma = 22,02$), то образовавшаяся водная масса будет иметь следующие параметры: соленость $S' = 31,18\%$, температура $T' = 14,25^\circ\text{C}$, условная плотность $\sigma = 23,38$, т. е. имеет место уплотнение на $\Delta\sigma = 1,36$ [77].

Морские льды

Льды в морях различаются по происхождению — выделяют морской лед, материковый лед и речной лед. Основными районами распространения льда являются Северный Ледовитый океан, моря северных частей Тихого и Атлантического океанов и моря, омывающие Антарктиду. Морской лед — это лед образовавшийся при замерзании морской воды. В ряде районов Мирового оксана почти всегда минусовые температуры поверхностного слоя воды. Характерным признаком морского льда является наличие в нем солей. Материковый, или глетчерный лед образуется при обламывании ледников, сползающих в оксан, и из снега, выпавшего на суше. Материковый лед является пресным, основная его масса сосредоточена у берегов Антарктиды. Речной лед, выносимый из рек, пресный и содержит много примесей. Основная масса речного льда сосредоточена в бассейне Северного Ледовитого океана.

В Северном полушарии наибольшая стадия развития ледяного покрова достигается в марте, в это время льды занимают

площадь около $14 \cdot 10^6$ км², в летние месяцы площадь ледового покрытия уменьшается вдвое. В центральной части Северного Ледовитого океана лед сохраняется в течение всего года и находится в постоянном движении. Средняя граница льдов в северной части Атлантики проходит около 72° с.ш. Айсберги зарождаются на побережье Гренландии, берегах Шпицбергена, Земли Франца-Иосифа, Новой Земли, Северной Земли. К южной оконечности Ньюфаундленда выносятся ежегодно до 300 айсбергов. В южном полушарии площадь, занятая льдами, в зимние месяцы составляет около $23 \cdot 10^6$ км², в летнее время площадь ледового покрытия уменьшается до $4 \cdot 10^6$ км². Льды в тихоокеанском и индийском секторах достигают 58° ю.ш., в атлантическом секторе льды достигают 50° ю.ш. Айсберги выносятся значительно ближе к экватору, чем морской лед.

Характеристики льда сильно зависят от его возраста. В зависимости от возраста различают следующие виды льда: ледяные иглы и ледяное сало — первая стадия образования льда; нилас (тонкий эластичный лед толщиной до 10 см) — вторая стадия образования льда; молодой лед, который подразделяется на серый толщиной 10–15 см и серо-белый толщиной 15–30 см; однолетний лед, толщиной до 30 см, просуществовавший не более одной зимы; старый лед — лед, который не успел растаять в течение одного лета. Старый лед, в свою очередь, подразделяется на следующие виды: остаточный однолетний, двухлетний, многолетний. Толщина остаточного льда, в зависимости от климатических условий, изменяется от 50 до 150 см. Толщина двухлетних и многолетних льдов превышает 2 м [47].

Пресная вода и соленая замерзают при разной температуре, температура замерзания соленой воды ниже температуры замерзания пресной воды ($T_{\text{пресн}} > T_{\text{солен}}$). Соленость оказывает большое влияние на рост и форму кристаллов. В морской воде при ее замерзании происходит раздельное образование структур льда и каждой соли. Объединение воды и соли в кристалл происходит только на дефектах кристалла льда. В начальной стадии образования льда важную роль играют центры кристаллизации льда. Кристаллизация солей в морской воде происходит раздельно в зависимости от температур их фазовых переходов. Сложный состав морской воды обуславливает и сложность фазовых переходов в ней.

Процесс замерзания солоноватых вод с соленостью ниже 24,695‰ происходит подобно замерзанию пресного льда: сначала вода достигает температуры максимальной плотности, а затем точки замерзания. При солености 24,695‰ температура

замерзания равна температуре максимальной плотности. При солёности большей 24,695‰ температура наибольшей плотности ниже температуры замерзания, поэтому процесс замерзания морской воды происходит иначе, чем пресной. При замерзании только часть солей переходит в лёд, другая часть стекает в воду в виде солевого раствора, увеличивая солёность воды. При быстром замерзании морской воды образуется молодой морской лёд, который содержит большой процент рассола, так как из-за быстрого процесса замерзания он не успевает вытесняться и остаётся внутри морского льда. При понижении температуры вода из рассола вымерзает, что увеличивает солёность оставшейся части рассола. Со временем рассол медленно стекает вниз, в результате чего старый лёд более пресный, чем молодой.

Морской лёд кроме кристаллов пресного льда содержит жидкую фазу, пузырьки воздуха, мелкие водоросли, другие посторонние примеси. Сложный состав морского льда приводит к изменчивости его теплофизических (теплоёмкость, теплота плавления, теплопроводность), механических, оптических характеристик, закономерностей роста и таяния, поведения льда под нагрузками. Например, эффективная теплоёмкость льда определяется средневзвешенным значением суммы теплоёмкостей кристаллов льда, рассола и теплоёмкостью фазовых переходов, а средняя теплопроводность определяется как сумма теплопроводностей пресного льда и рассола с учётом их процентного содержания.

Следует отметить недостаточную степень изученности физико-химических характеристик морских льдов, особенностей дрейфа льдов и распространения волн различного типа под льдом, географических закономерностей их распределения, несмотря на большую научную и практическую важность указанных проблем.

Глава 7

Изучение Мирового океана

История открытия Мирового океана

История исследований Мирового океана неразрывно связана с историей его открытия. История эта полна и романтизма, и трагизма. Кратко опишем важнейшие этапы океанологических исследований [27, 38].

Первыми мореходами, о которых до нас дошли некоторые сведения, были финикийцы (3000 лет до н.э.). Сведения о Мировом океане в Древнем мире были далеко неполными и противоречивыми: одни считали известную тогда сушу островом среди единого океана, а другие рассматривали океаны как отдельные водоемы, окруженные сушей. Вторая точка зрения нашла свое отражение в атласе Птолемея и сохранялась в науке вплоть до IX века.

Средние века, по крайней мере для Европы, отличались застоем в науке, многое из знаний древних либо погибло в это время, либо надолго стало недоступным для пользования. Впоследствии многое, известное древним, пришлось открывать заново.

С IX века начинаются плаванья в Китай и в Индию, в это время уже известен компас (есть предположение, что в Китае уже за 2000 лет до н.э. применяли магнит для указания направления в путешествиях по пустыне). Первые упоминания о компасе в Европе относятся к XII–XIII вв. Он представлял собой магнитную стрелку, укрепленную на пробке, плавающей в сосуде с водой. И только в XIV в. итальянец Флавио Джойя укрепил стрелку на шпильку и снабдил компас картушкой — легким кругом, разбитым по окружности на 16 румбов. Появление компаса сделало мореплавание более безопасным и эффективным.

В X–XI вв. были осуществлены многочисленные плаванья норвежцев, которые увенчались открытием Гренландии, Лабрадора, Ньюфаундленда и северо-восточного берега Америки. И хотя норвежцы плавали в эти области Атлантического океана в течение трех веков, их открытия были прочно забыты, и Колумбу пришлось открывать Америку заново.

В XIII веке состоялось знаменитое путешествие Марко Поло в Индию и Китай.

В 1486 г. португальская экспедиция Бартоломео Диаша, идя открытым океаном, обогнула Африку с юга, не увидев при этом ее южной оконечности, и высадилась на африканский берег уже в Индийском океане. И только на обратном пути экспедиция обнаружила южную оконечность Африки и назвала ее мысом Бурь, впоследствии он был переименован в мыс Доброй Надежды. Один из участников экспедиции Диаша, а именно Мартин Бехайм, в 1492 г. построил глобус и нанес на него все известные к тому времени географические сведения. Отчеты Диаша об экспедиции были использованы Васко да Гама при разработке маршрута своего плавания к берегам Индии, и Диаш принимал участие в первой экспедиции Васко да Гама. Экспедиция Васко

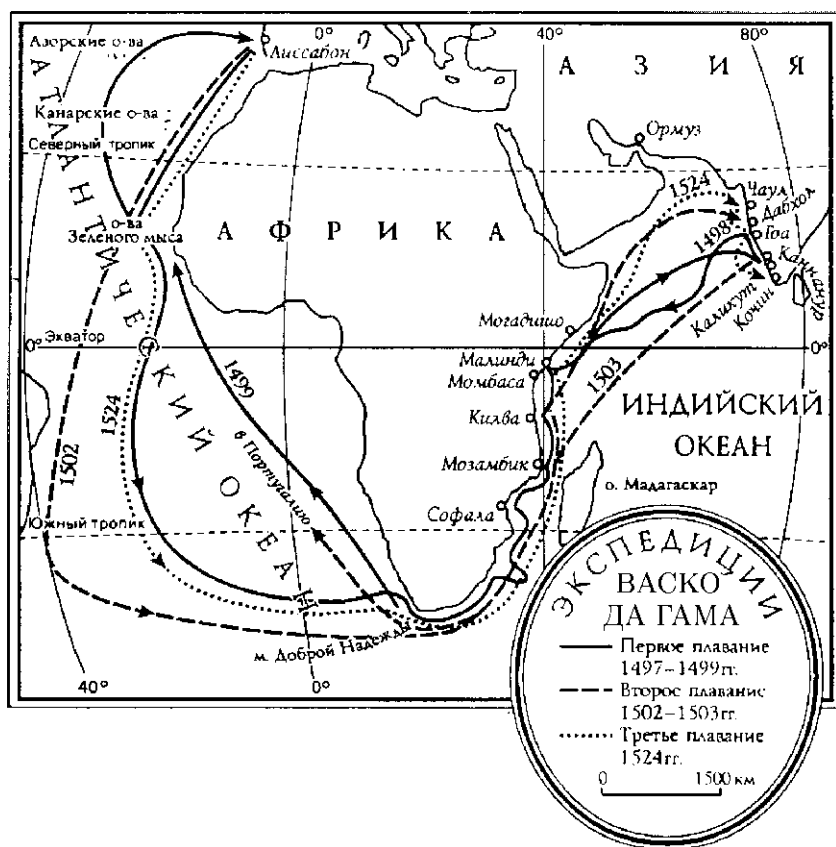


Рис. 7.1. Экспедиции Васко да Гама

да Гама, состоявшаяся в 1497 г., обогнув Африку, достигла берегов Индии (рис. 7.1).

Продолжались поиски новых путей в Индию и Китай и в последующие годы. Искать эти пути заставляли экономические причины. Дело в том, что к XV в. деньги стали всеобщим средством обмена, потребность в золоте для чеканки монет сильно возросла. Торговля с Востоком шла сухопутными путями, и посредниками между европейцами и Востоком были арабы, чьи владения лежали на пути из Европы в Индию и Китай. Однако появление и усиление турок, которое началось с X века, сильно осложнило пользование прежними путями торговли с Востоком. Турки захватили Константинополь, закрыли дороги через Среднюю Азию и Египет и стали, практически, абсолютными диктаторами на пути из Европы на Восток. Все это и подготовило эпоху Великих географических открытий, когда за 35 лет (1487–1522) была открыта почти половина поверхности Земли.

В эти годы состоялись четыре плавания Христофора Колумба (рис. 7.2), главным событием которых стало открытие Америки. Экспедиции Колумба положили начало великим открытиям за Атлантическим океаном, они были организованы испанским, а точнее, кастильским правительством для достижения морским путем «Индий», т.е. восточной и южной Азии. Первые две экспедиции Колумба (август 1492 г. – март 1493 г. и сентябрь 1493 г. – июнь 1496 г.) привели к открытию Антильских островов, в том числе Кубы, Гаити, Ямайки и Пуэрто-Рико. Датой открытия самой Америки считается 12 октября 1492 г. — день высадки Колумба на один из южных Багамских островов. Берег материка Америки был обнаружен на несколько лет позднее. Третья экспедиция Колумба открыла остров Тринидад и материк Южной Америки в районе реки Орипоко. Кастильское правительство считало, что Колумб не выполнил своей задачи (достижения «Индий» западным путем) и лишило его монопольного права открытий в западном направлении. После этого был целый ряд экспедиций, которые открывали различные части побережья Южной Америки. В одной из этих экспедиций в 1499–1500 гг. участвовал флорентиец Америго Веспуччи, именем которого и был назван материк. Четвертая и последняя экспедиция Колумба состоялась в 1502–1504 гг., и тогда Колумб открыл все побережье Центральной Америки (от Юкатана до Дарьенского залива). Во время своих экспедиций Колумб помимо Америки открыл Северное экваториальное течение, пересек Саргассово море и впервые обнаружил склонение магнитной стрелки, т.е. угол отклонения



Рис. 7.2. Плавания Христофора Колумба

магнитной стрелки от направления географического меридиана, знание которого необходимо для ориентации на местности.

В 1513 г. экспедиция, организованная губернатором о. Пуэрто-Рико, открыла мощное течение, выходящее в океан между полуостровом Флорида и островом Куба. Это был Гольфстрим. В том же 1513 г. испанцы пересекли Панамский перешеек (посуху) и открыли Тихий океан (Южное море). Открытие Панамского канала состоялось только в 1914 г.

Несмотря на такие значительные успехи в деле первооткрывательства новых земель, людей не покидала идея поиска нового пути в Индию, к Зондским островам. И в 1519 г. была снаряжена новая экспедиция под руководством Фернана Магеллана (рис. 7.3). Он открыл пролив в южной части Южной Америки и вышел в Тихий океан. Пролитв носит его имя. Название океану Магеллан дал за спокойную погоду, которая сопутствовала ему во время всего 90-дневного перехода к берегам Азии. Экспедиция подошла к Филиппинским островам, где в бою с туземцами 27 апреля 1521 г. Магеллан погиб. Однако экспедиция продолжала свой путь на запад, прошла через Зондские острова, пересекла Индийский океан, обогнула Африку и вернулась в тот порт, из которого вышла (Санлукар-де-Баррамедя). Этой экспедицией были достигнуты важнейшие в научном отношении результаты:

- было показано, что Земля сферична;
- подтверждено, что океан занимает большую часть земной поверхности планеты, чем суша.

После 1522 г., т. е. после окончания эпохи Великих географических открытий, проявилась тенденция к изучению северных областей Мирового океана. Были осуществлены плаванья англичан на север Канады, русские плаванья вдоль всего северо-восточного берега Азии. Достаточно вспомнить имена Джюзепа, Беринга, упомянуть Большую Северную экспедицию (1734–1741), во время которой были исследованы берега северных морей от Белого моря до реки Колымы.

В XVI веке продолжались исследования Зондских островов и появились предположения о существовании Австралии, но только в 1642 г. голландский мореплаватель Тасман впервые обогнул с юга Австралию и подошел к Новой Зеландии, которую принял за южный материк Антарктиду, о существовании которой уже в то время говорили.

Перелистывая историю исследований Мирового океана, нельзя не упомянуть экспедиции Кука, последняя из которых

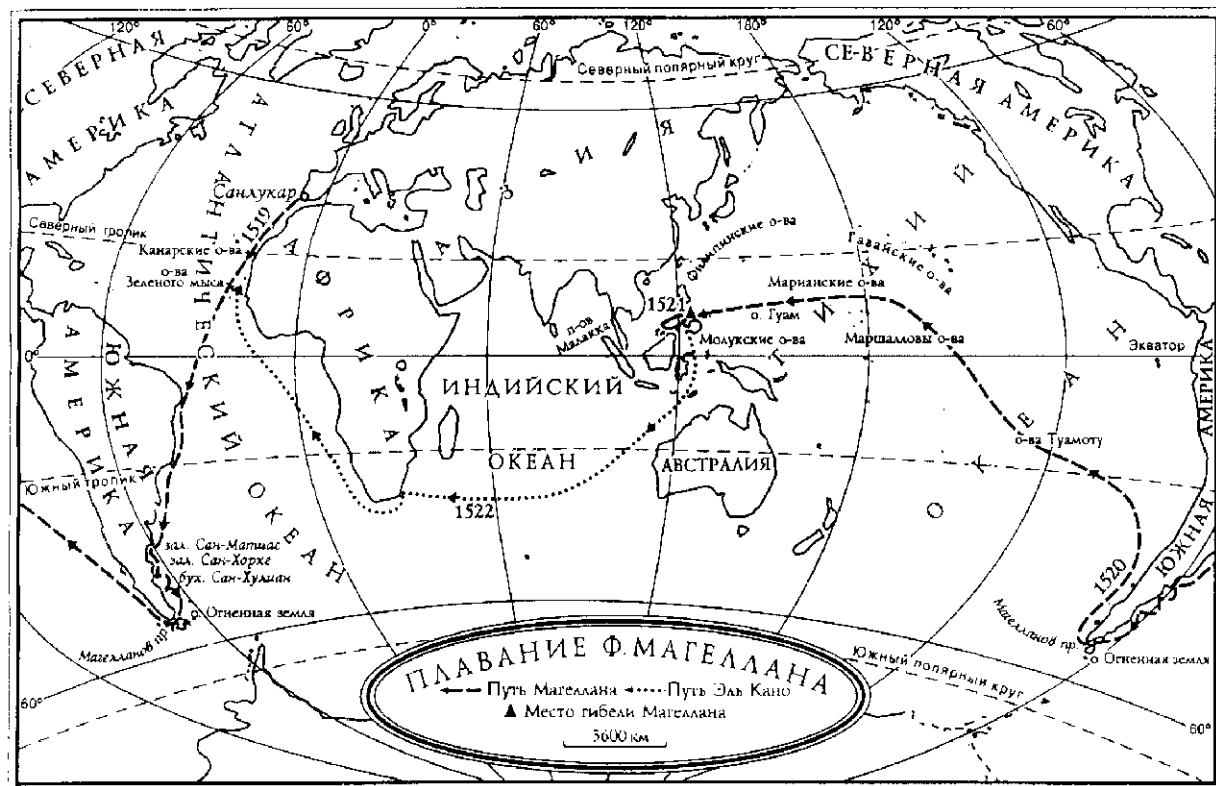


Рис. 7.3. Плавание Ф. Магеллана

состоялась в 1776–1779 гг. Джеймс Кук — английский мореплаватель, много сделавший для расширения наших знаний о Южном полушарии. Кук открыл ряд островов, пролив между северным и южным островами Новой Зеландии, исследовал восточное побережье Австралии. Кук совершил три кругосветных плавания, одно из которых было организовано с целью открытия южного материка (1772–1775). Кук достиг $71^{\circ}10'$ ю. ш., но материк не открыл и в своих записках об этом плавании написал, что этот материк открыть нельзя. Кук считал, что если материк и существует, то он расположен вокруг Южного полюса, где плавание невозможно. Авторитет Кука был настолько велик, что его убежденность в невозможности обнаружения южного материка явилась причиной того, что поиски шестой части света приостановились более чем на 40 лет. Во время третьей экспедиции Кук был убит на Гавайских островах местными аборигенами.

Русские моряки и ученые внесли выдающийся вклад в изучение Мирового океана [113]. Особенно велик вклад русских в освоение Северного Ледовитого океана. Ковчет «Витязь», на котором под руководством адмирала С. О. Макарова проводилось исследование Тихого океана, удостоен чести быть указанным на фронтоне Океанографического музея Монако наряду с «Фрамом» Нансена, «Вегой» Норденшельда и другими. Первое русское кругосветное плавание было осуществлено в 1803–1806 гг. Крузенштерном и Лисянским на кораблях «Надежда» и «Нева». Впервые были выполнены широкие океанографические работы в Атлантике, Тихом и Индийском океанах. Во время этого плавания было положено начало систематическим глубоководным исследованиям океанов. Впервые в мировой практике на «Надежде» исследовалось вертикальное распределение температуры воды на девяти глубоководных разрезах, измерялись плотности морской воды. В 1820 г. Беллинсгаузеном и Лазаревым была открыта Антарктида. Плавание Беллинсгаузена и Лазарева на шлюпах «Восток» и «Мирный» является важнейшим после плавания Кука и завершает эпоху Великих географических открытий. Все основные водные объекты были открыты. На шлюпе «Восток» был впервые применен батометр — прибор для отбора проб морской воды с различных глубин. Усовершенствованные батометры широко используются и в настоящее время. В ходе экспедиции были уточнены карты морских течений, навигационные карты, описаны ледовые поля, проводились эксперименты по замораживанию пресной и морской воды.

Следует упомянуть, что первый водомерный пост на Каспийском море для регулярных наблюдений за уровнем моря был установлен по указанию Петра I, а за работы по изучению Каспийского моря Петр I, первым из русских был избран членом Французской академии наук.

Во время кругосветной экспедиции 1815–1818 гг. Коцебу на шлюпе «Рюрик» организовал глубоководные (до двух километров) измерения температуры, обширные измерения температуры и течений в поверхностном слое. Впервые в океанографической практике проводились измерения прозрачности морской воды по глубине видимости белого диска. Этот метод благодаря своей простоте и надежности применяется в океанографической практике до сих пор. Во время кругосветной экспедиции в 1823–1826 гг. на шлюпе «Предприятие» под руководством Коцебу были открыты новые острова в архипелаге Туамоту, Самоа. Океанографические исследования во время этой экспедиции проводились под руководством Ленца, за которые он был избран в 1828 г. адъюнктом Петербургской академии наук. Ленц сформулировал положение о том, что теплые воды тропиков поверхностными течениями переносятся в высокие широты, а холодные воды полярных областей поступают в тропическую зону с глубинными течениями.

Для России чрезвычайно важными являются исследования, проводимые в Северном Ледовитом океане. Важность освоения Севера неоднократно подчеркивалась М. В. Ломоносовым, Д. И. Менделеевым [113]. Ломоносову принадлежат крылатые слова: «Богатство России будет прирастать Сибирью и Северным Ледовитым океаном». М. В. Ломоносов был инициатором и научным вдохновителем арктической экспедиции Чичагова, состоявшейся уже после смерти Ломоносова. В 1889 г. для исследования Арктики по инициативе Макарова был построен самый мощный по тому времени ледокол «Ермак» (водоизмещение 6 000 т, двигатель мощностью 10 000 лошадиных сил), прослуживший долгие годы в Арктике. Макарову принадлежат классические исследования гидрологического режима проливов, уже упоминавшиеся фундаментальные исследования северной части Тихого океана, проведенные на корвете «Витязь». Степан Осипович Макаров считается одним из основателей современной океанологии.

Первый переход Северного Ледовитого океана вдоль берегов Европы и Азии до Берингова пролива был совершен в 1878–1879 гг. шведской экспедицией под руководством Норденшельда. Экспедиция была проведена на средства России и Швеции.

В 1894–1896 гг. под руководством Нансена было совершено знаменитое плавание на «Фраме». Первый переход вдоль берегов Северной Америки был совершен норвежской экспедицией под руководством Амундссена на судне «Йоа» в 1903–1906 гг. Обширные исследования северных морей были выполнены в СССР по программе 2-го Международного полярного года (1932–1933). Новый период исследования Арктики начался с создания ледовых станций. До ледовой станции «Северный полюс» позднее «СП-1» (1937–1938) — в районе Северного полюса никто не проводил научные исследования. Одним из организаторов арктических исследований был академик О. Ю. Шмидт.

Арктический регион не перестает удивлять своими возможностями. Во время очередного рейса научно-исследовательского судна в центральную часть Арктики в 2001 г. были открыты несколько действующих подводных вулканов. В Северном Ледовитом океане обнаружены обширные поля гидротермальных источников, населенные ранее неизвестными науке биосообществами, обширные месторождения нефти, газа и газогидратов, насыщенных метаном и другими горючими газами. Возможно газогидраты являются одним из видов будущих энергоносителей.

В 1872 г. состоялось плавание английской экспедиции на судне «Челленджер», явившееся поворотным пунктом в развитии морской науки. Эта экспедиция была осуществлена на специально оборудованном для морских научно-исследовательских работ корабле. Во время экспедиции было испытано много новых приборов и методов для исследования океана. Определялись глубина, состав грунта морского дна, придонная температура, брались пробы морской воды, добывались донные животные и растения. Интересно, что новая идея измерения глубины была предложена У. Томсоном (лорд Кельвин) во время плавания на «Челленджере». За три с половиной года экспедиции было выполнено 362 глубоководных станции. Обработка результатов экспедиции продолжалась несколько лет и составила труд объемом в 50 томов. Считается, что именно с плавания «Челленджера» начинается целенаправленное исследование Мирового океана.

В 1885 г. обширные научные исследования Мирового океана начались под руководством принца монахского Альберта. На специально построенных судах исследования проводились в Средиземном море и в Атлантическом океане от Шпицбергена до экватора. По инициативе Альберта были организованы Океанографический музей в Монако в 1896 г. и Океанографический институт при Сорбонне в 1906 г.

В XX веке число морских чисто географических экспедиций сократилось, так как все основные географические объекты были открыты. Но увеличивается число так называемых океанологических экспедиций. К числу таких экспедиций относятся и работы на дрейфующих станциях «Северный полюс», и экспедиции в Антарктиде. Наиболее значимые результаты океанологических экспедиций — открытие экваториального противотечения, глубинных течений Кромвелла в Тихом океане и Ломоносова в Атлантике.

Развитие подводного атомного флота инициировало очередной взрыв интереса к изучению глубин океана в 50–60-е гг. XX века. Для обеспечения скрытности и безопасности эксплуатации дорогостоящих технических объектов потребовалось развитие акустики и оптики океана, теории струй, волн и турбулентности.

Современное состояние исследований Мирового океана

Изучение процессов, протекающих в океане, требует привлечения большого количества кораблей и аппаратуры, т.е. это достаточно дорогостоящий процесс. Поэтому в последние десятилетия прошлого века стали осуществляться крупные международные проекты, в выполнении которых участвовали ученые многих стран. Эти исследования значительно дополнили наши знания о Мировом океане. Основную информацию о физических параметрах в атмосфере и гидросфере Земли получают на гидрометеорологических станциях и постах. Эти данные получаются по специальным программам и стекаются в один центр. Однако сеть таких станций весьма неравномерна. Над океанами она более редкая, чем над сушей, и на многих значительных акваториях Мирового океана станций практически нет.

Чтобы восполнить сеть стационарных станций наблюдений, в определенных точках Мирового океана дежурят суда, периодически сменяя друг друга, проводятся гидрологические разрезы по одним и тем же маршрутам, ставятся в открытом океане радиобуи, применяются трансозонды для горизонтального зондирования значительных площадей Мирового океана.

В конце 60-х годов стало очевидно, что использование «кораблей погоды» для наблюдений за состоянием океана и приповерхностной атмосферы дорого и малоинформативно. Не оправдала себя и идея глобального океанского мониторинга с помощью сети тяжелых якорных буев, которые оснащались датчиками для измерения метеорологических и океанографических параметров.

С целью изучения глобальной циркуляции в океане были проведены крупные международные проекты. В конце 70-х гг. — Первый глобальный эксперимент (ПГЭП). В ходе выполнения этого проекта только в Южном полушарии между 20 и 65° ю. ш. было размещено 300 дрейфующих буйев, положение которых отслеживалось спутниками. В 1977–1978 гг. в Атлантическом океане был выполнен советско-американский эксперимент «ПОЛИМОДЕ», в ходе которого были исследованы синоптические вихревые системы, открытые советскими учеными ранее. В экспериментах «ПОЛЭКС-ЮГ»–«АЙСОС» в 1974–1983 гг. советскими и американскими учеными изучалось Антарктическое циркумполярное течение. Впервые были получены данные о распределении скоростей течений по глубине. Оказалось, что на глубинах в 3000 м максимальная скорость течения может достигать 70–80 см/с. Для изучения закономерностей дрейфа льда, его выноса из Арктического бассейна в Северную Атлантику были выполнены в 1967–1984 гг. международные программы «АЙСЕК», «АОБП». Наиболее масштабный океанологический проект был выполнен в конце 90-х гг. по программе «ВОСЕ», в ходе которого исследовалась глобальная циркуляция Мирового океана, перенос тепла, влаги, солей, влияние вихревых структур, климатическая и погодная изменчивость.

Ураганы, тайфуны, морозы, шторма и другие погодные аномалии все еще приходят неожиданно и совсем не туда, где ожидаются. Возникла парадоксальная ситуация — появление новых глобальных инструментов, повышение точности отдельных измерений и увеличение их объема не способствовали повышению надежности прогноза эволюции природных систем, выделению антропогенных факторов, снижению экономического ущерба от природных катастроф.

Необходимость перестройки современного государственного подхода в России к изучению Мирового океана была отмечена в письме группы выдающихся ученых, следствием которого стали поручения президента и правительства о подготовке концепции федеральной целевой программы «Мировой океан». Программа «Мировой океан» была утверждена и начала финансироваться. Вслед за Россией к ревизии своей морской политики приступили и другие промышленно развитые страны. Особенно серьезный характер эта работа приняла в США, где одновременно были созданы специальные рабочие группы в конгрессе, Национальной академии наук и администрации президента. Для координации

практических работ создан Межотраслевой комитет по морским наукам и технологиям.

В 1999 г. Комиссией МОК (Межправительственная океанографическая комиссия) и ВМО (Всемирная метеорологическая организация) представлена стратегия проведения глобальных дрейферных наблюдений для построения наблюдательных систем за состоянием океана и климата. В том же году была создана Объединенная техническая комиссия для океанографии и морской метеорологии (JCOMM). Структура наблюдательного

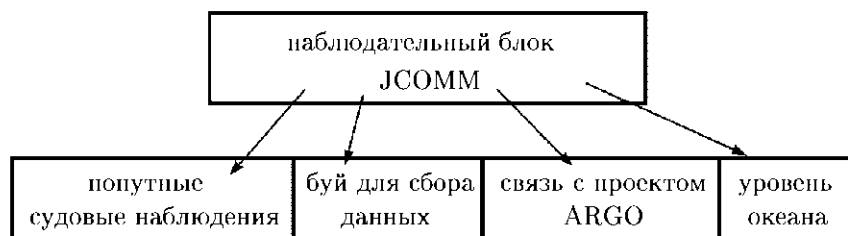


Рис. 7.4. Структура наблюдательного блока JCOMM

блока JCOMM приведена на рис. 7.4. Наибольший вес в получаемых данных наблюдений имеют буйковые измерения. Согласно имеющимся планам до 2005 г. будет размещено около 3000 дрейферов, одна половина — в 2000–2003 гг., вторая половина — между 2003 и 2005 гг. В целом предполагается размещать 500–700 дрейферов в год.

Наиболее широкое распространение пока нашли дрейферы поверхностного слоя, общий вид такого дрейфера представлен на рис. 7.5. Дрейферы в физическом смысле являются квазилагранжевыми частицами, «вмороженными» в окружающую



Рис. 7.5. Лагранжевый SVP-B дрейфер

водную массу. Дрифтеры обладают большим брезентовым подводным парусом цилиндрической формы (высотой 6 м и диаметром 1 м), центр сопротивления которого расположен на глубине около 15 м. На таких глубинах влияние ветровых волн и дрейфовых течений является уже незначительным и, следовательно, дрейфтер переносится непосредственно океанскими или морскими течениями. С помощью толстого кабеля-троса парус связан с небольшим поверхностным поплавком, в котором находится передатчик, периодически передающий сигналы, принимаемые на спутниках системы «Аргос». По доплеровскому эффекту спутники определяют координаты дрейфтера с точностью не хуже нескольких сотен метров. В средних широтах координаты определяются 6–8 раз в сутки. Кроме того, размещенные в поплавках дрейфтеров датчики температуры поверхности воды (SVP дрейфтеры) и атмосферного давления (SVP-B дрейфтеры) благодаря спутниковой связи позволяют передавать на Землю в центры приема (США, Франция и другие страны) информацию о текущих значениях этих гидрометеорологических параметров практически в реальном времени. Эта оперативная информация используется для прогноза погоды. Данные об атмосферном давлении, поставляемые дрейфтерами с открытых океанских акваторий необходимы для составления прогнозов в оперативной метеорологии.

В 1999–2001 гг. Морским гидрофизическим институтом Национальной академией наук Украины и Институтом океанологии РАН был проведен первый международный эксперимент по мониторингу Черного моря с помощью дрейфтерных методов измерения течений. На рис. 7.6 приведен пример инфракрасного изображения температуры поверхности северо-восточной части Черного моря с нанесенными на него маршрутом судна, точками выполнения гидрологических станций, траекториями дрейфтеров [60].

Помимо дрейфтеров поверхностного слоя используются дрейфтеры, способные погружаться до глубины 2000 м и дрейфовать на этих глубинах. Эти дрейфтеры периодически всплывают. Всплывая, дрейфтеры собирают информацию о вертикальном распределении температуры и солености океанических вод, которая передается на спутник.

В настоящее время в океане работает примерно 800 дрейфтеров SVP-класса, эксплуатация которых высветила ряд проблем, требующих быстрого решения. Одной из наиболее важных проблем является проблема надежности. В настоящее время дрейфтеры размещаются в океане авиационным путем (сбрасываются с

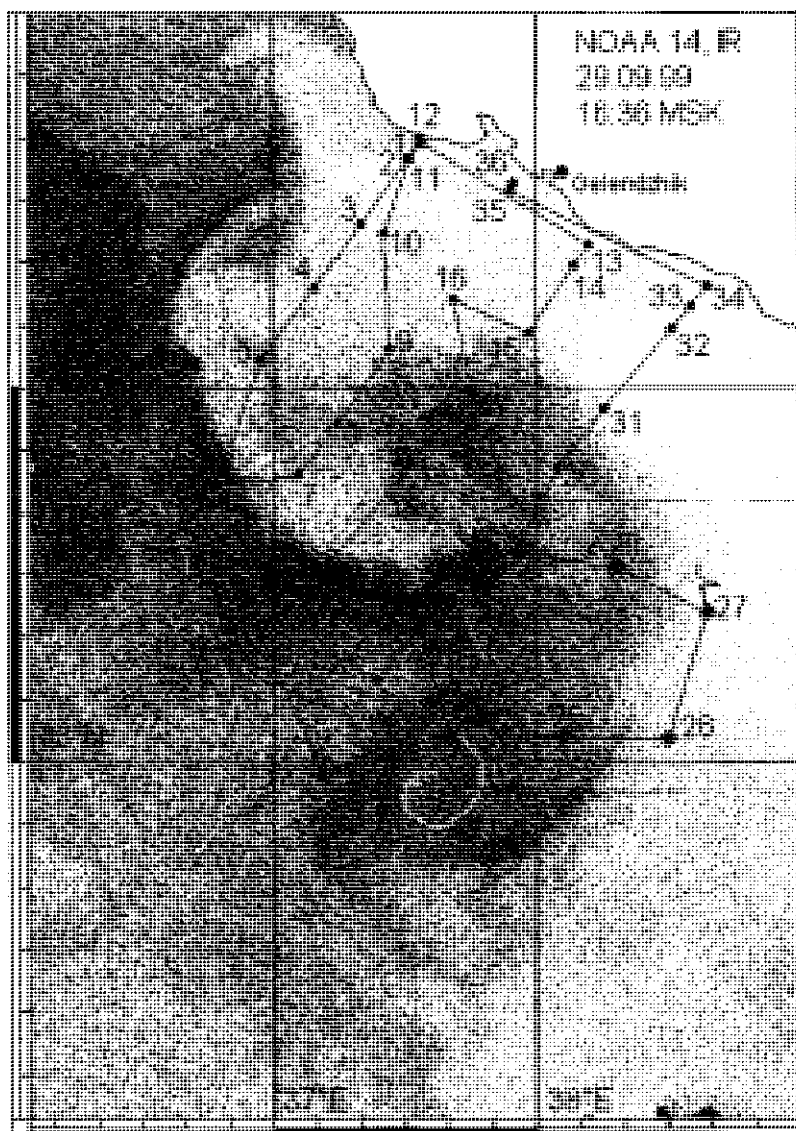


Рис. 7.6. Инфракрасное изображение температуры поверхности северо-восточной части Черного моря с нанесенным на него маршрутом судна и точками выполнения гидрологических станций. Криволинейные отрезки изображают траектории дрейфтеров за первые 4 суток дрейфа

самолетов в различных точках Мирового океана), что позволяет размещать их в отдаленных океанских регионах. Опыт выполненных уже наблюдений показывает, что 30% размещенных таким методом дрейфтеров выходит из строя сразу после приводнения. Большинство дрейфтеров замолкает задолго до контрольного срока в один год. Усилия ученых и конструкторов направлены на ликвидацию выявленных недостатков.

Сравнительно низкая стоимость дрейфтеров и спутниковой связи, а также долгий срок их службы (1–2 года) сделали их весьма распространенным в настоящее время средством изучения течений Мирового океана и гидрометеополей, в том числе, что очень важно, в районах, отдаленных от центров цивилизации.

В настоящее время для получения информации о термодинамическом состоянии атмосферы и океана широко используются возможности искусственных спутников Земли. Основная трудность здесь заключается в расшифровке этой информации и получении не только качественной картины, но и количественных характеристик. Например, измерение температуры воды поверхностного слоя моря может эффективно осуществляться дистанционными средствами: ИК-радиометрами с самолетов, судов и спутников. Для коррекции влияния атмосферы выполняются замеры радиационной температуры воды с трех уровней: судна, самолета и спутников. Первичная информация со спутников может приниматься как на собственных региональных центрах, так и из Интернета. Широко представлена информация с разных спутников, а также методика обработки и анализа данных на сайте Института космических исследований РАН (<http://smis.iki.rssi.ru/welcome.html>), центра НОАА (<http://www.saa.noaa.gov/>). Например, первичная информация, получаемая аппаратурой AVHRR со спутника НОАА, представляет собой изображение подспутникового пространства радиометром в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра (0,58 0,68; 0,725 1,1; 3,55 3,93; 10,5 11,5; 11,5 12,5 мкм) с пространственным разрешением 0,8 1,1 км.

В исследованиях океана в настоящее время широко применяется лазерное зондирование, осуществляемое с помощью спектроскопических лазерных локаторов [133] лидаров (LIDAR Light Detection and Ranging). Дистанционные методы делятся на два класса — пассивные и активные. В первом случае используются радиометры и сканеры, во втором — локаторы. Все эти приборы работают в СВЧ, ИК и видимом диапазонах оптического спектра. В качестве носителя радиометра используется широкий набор «платформ» — от

судов до спутников. Локаторы (в оптическом диапазоне — лидары) размещают на самолетах и вертолетах, судах, береговых станциях и морских платформах. Пассивные и активные методы и средства значительно различаются по своим диагностическим возможностям.

В настоящее время с помощью лидара берегового базирования возможно дистанционное определение температуры и солености морской среды; определение *in situ* нефтяных загрязнений морской среды в прибрежных акваториях и идентификация типа гумусового вещества в морской воде; биоиндикация качества морской воды [134].

Типичный спектр флуоресценции фитопланктона при возбуждении лазерным излучением на длине волны $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм представлен на рис. 7.7. Спектр содержит единственную полосу

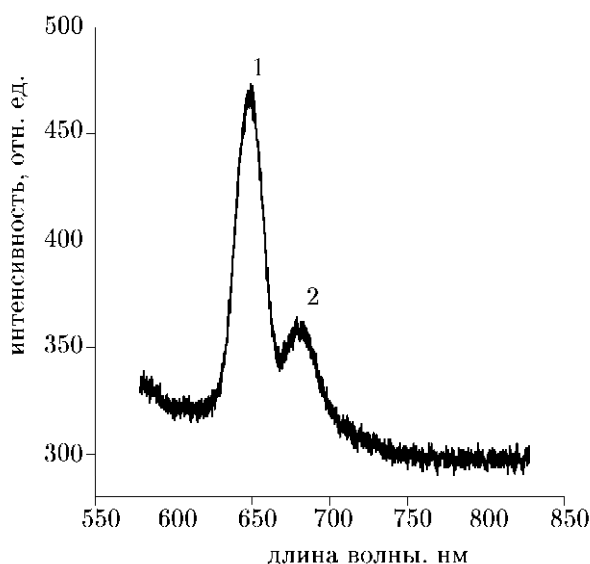


Рис. 7.7. Спектр морской воды (длина волны возбуждения $\lambda_{\text{exc}} = 532$ нм): 1 — полоса комбинационного рассеяния молекул воды; 2 — полоса флуоресценции фитопланктона

флуоресценции фитопланктона с максимумом на $\lambda_{\text{exc}} = 685$ нм, одинаковую по форме и положению для многих групп водорослей. Важнейшей проблемой во флуоресцентной диагностике фитопланктона является определение видовой принадлежности

и состояния водорослей. Эти данные важны как для оценки первичной продукции, так и для создания дистанционного метода биоиндикации состояния экосистемы водоема.

Лидары делают возможным не только определение вида нефтяного загрязнения (рис. 7.8), но и дистанционное лазерное определение толщины нефтяной пленки на поверхности воды. Предложено несколько лазерных методов решения этой задачи, во всех этих методах тем или иным образом используется сигнал комбинационного рассеяния воды, который индуцируется лазерным лучом в водной толще под пленкой. Интенсивность регистрируемого сигнала комбинационного рассеяния воды зависит от оптической толщины пленки на длинах волн лазерного излучения и комбинационного рассеяния воды и, следовательно, от геометрической толщины пленки.

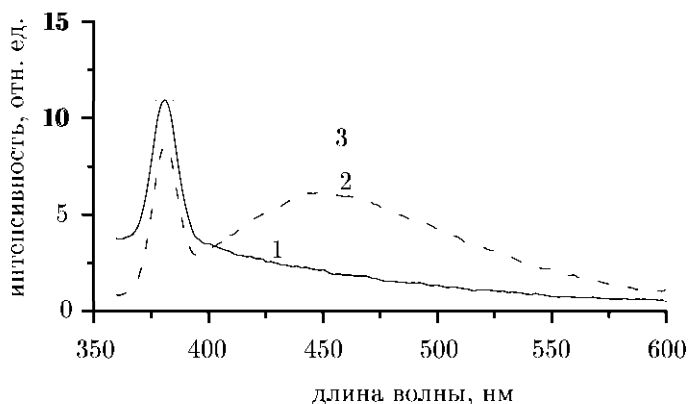


Рис. 7.8. Типичные спектры флуоресценции немецкой нефти (1), фульвокислоты (2) и их смеси (3) в дистиллированной воде; $\lambda_{\text{exc}} = 337 \text{ нм}$

Большие перспективы для лазерного мониторинга открывает использование математических методов, основанных на технике искусственных нейронных сетей [134]. Важным свойством метода искусственных нейронных сетей является то, что в нем практически не используются какие-либо априорные знания об объекте исследования, а работа алгоритмов основана исключительно на информации, содержащейся во входных данных. Эта информация усваивается и обобщается нейронной сетью, которая делает свои оценки не только на основе предъявленного ей в данный момент примера, но и на основе всех тех примеров, которые содержались в обучающей выборке.

Подобные методы особенно эффективны в ситуациях, когда решение задачи плохо алгоритмизуемо или методы ее точного решения отсутствуют, а данные противоречивы и содержат значительную шумовую составляющую. Именно к такому классу задач относятся многочисленные обратные задачи, которые приходится решать при изучении Мирового океана.

Глава 8

Термодинамика океана

Лучистая энергия Солнца в океане

Основным энергетическим источником для всех геофизических процессов, происходящих на Земле, является энергия Солнца. Естественно, это относится и к Мировому океану. Существуют еще два источника энергии, о которых следует упомянуть, так как они тоже играют определенную роль в формировании динамического и теплового режимов гидросферы. Это приливообразующие силы, которые вызывают приливы и отливы в Мировом океане и связанные с ними приливные течения, и геотермальные источники, располагающиеся на дне водоемов, в том числе на дне морей и океанов, которые формируют температурное поле водоемов вулканического происхождения и отдельных областей Мирового океана. Но основной источник, питающий все геофизические процессы — Солнце.

Благодаря огромной теплоемкости, намного превышающей теплоемкость суши и атмосферы, океан является терморегулятором нашей планеты. Только верхний 10-метровый слой океанических вод содержит тепла больше, чем вся атмосфера, эффективная высота которой равна 10 км. В глубинах же океана тепла в сотни раз больше, чем в этом верхнем слое. Поэтому даже при незначительном изменении температуры океана в атмосферу или из нее устремляются большие потоки тепла. Регулирующее влияние оказывает океан и на влагооборот в системе атмосфера-гидросфера. На испарение тратится, а при конденсации выделяется более $1/3$ всего тепла, поступающего на Землю. А источником водяного пара является океан. Кроме того, океан поддерживает постоянство газового состава атмосферы. Океан прекрасно растворяет углекислоту, образующуюся при взаимодействии CO_2 с парами воды, и тем самым смягчает пагубные воздействия парникового эффекта. Углекислоту связывают также зеленые водоросли океана.

Океан участвует и в поставке в атмосферу кислорода. Растворенный в воде воздух содержит O_2 в два раза больше, чем атмосферный. Верхние слои океана получают O_2 от мельчайших

водорослей (фитопланктона) в результате фотосинтеза. При волнении и при прогреве этот кислород поступает в нижние слои атмосферы. И хотя этот источник меньше, чем тот, который связан с фотосинтезом растительного покрова планеты, однако он есть и его роль велика.

Что же происходит с той частью солнечной энергии G , которая проникает под поверхность Мирового океана и которая может быть записана в виде

$$G = (1 - A)J,$$

где J — солнечная энергия, приходящая на морскую поверхность, A — альбеда океана. Распространяясь в толще вод Мирового океана, солнечное излучение испытывает ослабление вследствие поглощения и рассеяния. Океан, так же как и атмосфера, является примером мутных сред, т. е. сред, в которых локальные неоднородности плотности возникают из-за наличия взвесей, частиц органического и неорганического происхождения [43, 49]. Поэтому рассеяние солнечной энергии при распространении в океане включает в себя рассеяние как на отдельных молекулах, так и на крупных взвешенных частицах. По характеру рассеяния различают два вида рассеяния:

— на частицах, диаметр которых меньше длины волны излучения: $D < \lambda$;

на частицах, диаметр которых сопоставим или больше длины волны: $D > \lambda$.

Пример рассеяния первого типа — молекулярное рассеяние, основы теории которого заложены Рэлсем. Для этого типа рассеяния зависимость коэффициента рассеяния от длины имеет следующий вид:

$$K_{\text{рас}} \sim a\lambda^{-4}.$$

Так, для излучения с длиной волны $\lambda = 0,44$ мкм (фиолетовая область) коэффициент рассеяния $K_{\text{рас}}$ в 5,1 раза больше, чем для $\lambda = 0,66$ мкм (красная область). Теория Рэлея хорошо оправдала себя при объяснении явлений, происходящих в разреженных газах и, в частности, в атмосфере. Однако применение ее для количественного описания рассеяния света в океане менее удачно, так как здесь молекулярные расстояния сравнимы с размерами молекул. По Рэлею должно было бы быть ослабление полного потока, так как световые волны, рассеянные соседними

молекулами, будут мало отличаться друг от друга по фазе и должны интерферировать между собой.

Процесс рассеяния света в жидкости лучше описывает теория Смолуховского, которая рассматривает рассеяние не на отдельных молекулах, а на неоднородностях среды, обусловленных случайными изменениями плотности вследствие теплового движения молекул. При этом в теории Смолуховского, как и в теории Рэлея, при $D < \lambda$ также получается зависимость $K_{\text{рас}} \sim \lambda^{-4}$. Таким образом, и в воде сильнее всего рассеиваются синие лучи, а слабее всего — красные. Часть световых лучей, рассеянных в водоеме, выходит из воды, попадает в наш глаз и участвует в формировании цветового восприятия моря. Цвет моря определяется соотношением отраженного водой светового потока и светового потока рассеянного света, исходящего из глубины моря. Цвет моря сильно зависит от количества взвеси в воде. Синий цвет — очень прозрачная вода, сине-зеленый и зеленый — в воде много взвешенных частиц, сильно рассеивающих свет, желто-коричневый — много желтого вещества (распад планктона или гумусовые соединения). Последнее явление характерно для болот или озер, питаемых болотными водами.

Иные закономерности имеют место для рассеяния света на крупных частицах в воде, для которых $D > \lambda$. Академик В. В. Шулейкин показал, что в этом случае зависимость $K_{\text{рас}}$ от длины волны излучения становится меньше, чем при молекулярном рассеянии [157].

Несмотря на существенное рассеяние солнечного излучения водой, основным механизмом, обуславливающим ослабление его с глубиной, является поглощение, характеризуемое объемным показателем поглощения χ . Коэффициент рассеяния морской воды $K_{\text{рас}}$ меньше коэффициента поглощения χ . Величина коэффициента поглощения χ для солнечной радиации меняется на несколько порядков в зависимости от длины волны излучения. На рис. 8.1 приведена зависимость показателя ослабления стандартной морской воды $\epsilon = K_{\text{рас}} + \chi$, равного сумме коэффициентов рассеяния и поглощения от длины волны.

Наличие растворенных органических веществ, мелких частиц минерального происхождения приводит к резкому возрастанию ослабления в синей и ультрафиолетовой частях спектра. Показатель ослабления на крупных частицах (диатомовые водоросли, детрит, фораминиферы) практически не зависит от длины волны светового излучения. Результирующее ослабление морской воды будет определяться суммарным действием указанных факторов, поэтому показатели ослабления для различных морских

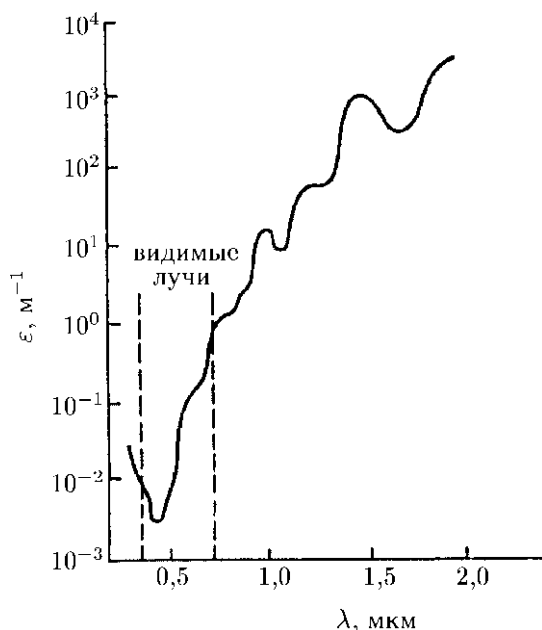


Рис. 8.1. Спектр объемного показателя поглощения стандартной морской воды в диапазоне длин волн солнечной радиации

вод значительно различаются, особенно в коротковолновой части спектра. Например, в Балтийском море показатель ослабления в синей области на порядок больше показателя ослабления чистых океанских вод.

Простейшие оптические измерения пачали проводить с помощью белого диска (диаметр стандартного диска равен 30 см). Накоплен значительный объем этих простейших измерений, характеризующих состояние морских вод. При измерениях фиксировалась глубина, на которой диск переставал быть видимым. Эта глубина называется относительной прозрачностью. Существуют эмпирические формулы, связывающие относительную прозрачность морской воды с показателем ослабления.

А. Г. Колесников предложил использовать следующую форму записи для величины плотности потока радиации $G(z)$, достигшего глубины z :

$$G(z) = G_0(1 - A) \sum_m J_m \exp(-\chi_m z).$$

Здесь χ_m — коэффициент ослабления (поглощение + рассеяние)

солнечной радиации в определенном участке спектра (m), G_0 — плотность потока солнечной радиации, падающей на поверхность океана, A — альбедо океанической поверхности, $J_m = G_m/G$, G_m — доля солнечной радиации, приходящейся на участок спектра m . Результаты натурных измерений показали, что в приведенной формуле достаточно двух-трех членов.

Первый метр глубин морской воды поглощает от 60 до 90% поступающей в океан радиации. Ниже глубины 50 м проникает всего 0,05% излучения. В то же время излучение желто-зеленой области спектра может проходить и проходит до глубин в десятки и сотни метров.

Изучению закономерностей распространения световых волн в океане посвящен раздел физики моря — оптика моря. Эти работы не только важны как фундаментальные исследования оптики мутных сред, но и необходимы для решения целого ряда прикладных задач. Так, учет гидрооптических особенностей водных масс зачастую помогает разобраться в вопросах термического и динамического режимов водосмов, необходимы они и для определения видимости подводных объектов, для изучения влияния лучистой энергии на жизнедеятельность водных организмов. Гидрооптические исследования важны также и с позиций экологии, поскольку являются методами контроля чистоты водных масс.

Вертикальное распределение температуры и солености воды в океане

Итак, океан поглощает большую часть солнечной радиации, которая проходит через его поверхность, причем это поглощение носит объемный, а не поверхностный характер. Океан как бы запасает тепло и нагревается. Но тепло, поглощенное водной массой в какой-либо точке (на глубине), не остается в этой точке постоянно. В океане существует целый ряд процессов, которые обуславливают перенос тепла от точки к точке, формируя как вертикальное распределение температуры в океане, так и горизонтальную структуру поля температуры.

Познакомимся с тем, как выглядит вертикальное распределение, или, как принято чаще говорить, вертикальный профиль температуры в океане. Сначала вспомним о возможном характере движения воздушных и водных масс — ламинарном и турбулентном. Этим вопросом занимался известный гидродинамик Рейнольдс. Им был введен критерий, носящий его имя и имеющий вид

$$Re = UL/\nu,$$

где U , L , ν — масштабы скорости, длины, и коэффициент кинематической вязкости соответственно. По результатам своих опытов Рейнольдс определил, что в трубах переход от ламинарного характера движения к турбулентному происходит при $Re \cong 2000$.

Сначала считалось, что это значение числа Рейнольдса, получившее название критического, универсально и справедливо для всех потоков (в трубах, каналах, руслах рек, морских течениях), т. е. что в потоке любой конфигурации и масштаба переход от ламинарного к турбулентному характеру движения будет происходить при $Re \cong 2000$. Дальнейшие исследования показали, что это не так, и можно с помощью некоторых технических ухищрений «затянуть» ламинарный режим до $Re = 40\,000$, но можно получить турбулентное течение и при $Re = 100$. Однако величина числа $Re \cong 2000$, декларированная Рейнольдсом, и до сих пор служит некоторым ориентиром.

Если применить этот критерий к океану и взять наиболее характерные значения величин, входящих в число Re , а именно $U = 1$ м/с, $L = 6$ км и молекулярную кинематическую вязкость воды, равную $\nu = 0,01 \cdot 10^{-4}$ м²/с, то $Re = 6 \cdot 10^9$. Согласно такому значению числа Re океан должен быть сильно турбулизирован, т. е. сильно перемешанным. При таких значениях числа Re все физические характеристики океана должны быть выровнены по глубине, в том числе и температура воды. Однако уже первые измерения вертикального распределения температуры воды в различных частях Мирового океана показали, что это не так. Многочисленные последующие экспедиции, во время которых проводились измерения температуры воды на различных глубинах, показали наличие сложного распределения температуры по глубине [25, 41, 44].

Характерные виды распределений температуры $T(z)$ по глубине показаны на рис. 8.2, 8.3. Как видно из рисунков, ни о каком полном перемешивании вод океана говорить не приходится, несмотря на огромное значение числа Re . Хорошо перемешанным можно считать только верхний слой океана толщиной $H \sim 10\text{--}100$ м, который получил название верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). Толщина его может меняться от десятков до сотен метров, а в мелких морях и до дна, в зависимости от гидрометеорологических условий. К ВКС примыкает слой сезонного термоклина (СТ) — слой с большими градиентами температуры и солености. ВКС и СТ образуют так называемый

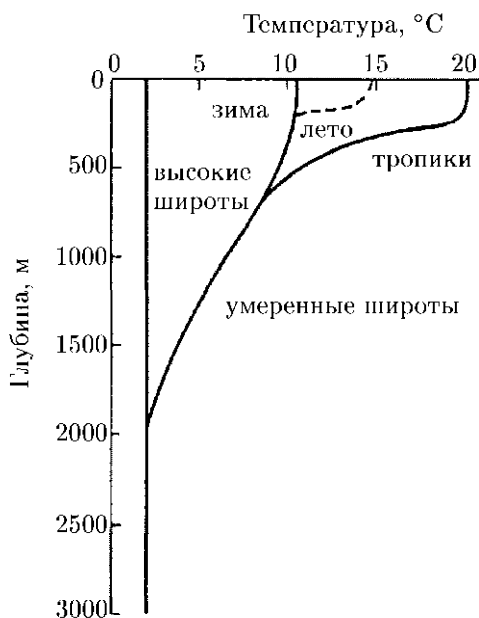


Рис. 8.2. Типичные кривые распределения температуры по глубине в тропиках, в умеренных и высоких широтах. Сезонный ход наблюдается только в пределах верхних 100 м

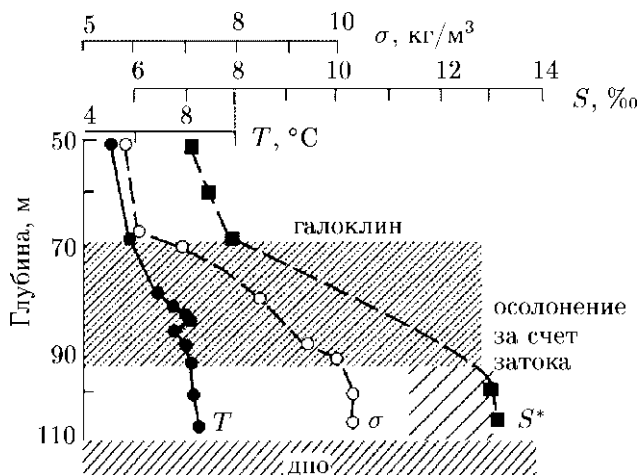


Рис. 8.3. Примеры распределения средних величин температуры T , солености S , плотности σ в центральной части Готландской впадины (по данным сканирующего зонда)

деятельный слой океана (ДСО) — слой, который подвержен непосредственному влиянию процессов энерго-, тепло- и массообмена с атмосферой, здесь же поглощается основная доля проникающей в воду солнечной радиации. При сильном охлаждении толщина ДСО может достигать нескольких сотен метров.

Ниже сезонного термоклина лежит главный термоклин (ГТ), охватывающий наибольшую часть океанических вод. Главный термоклин — область, где идет постепенное изменение температуры и солености с глубиной, но вертикальные градиенты этих величин значительно меньше, чем в слое сезонного термоклина. Структура главного термоклина формируется уже не процессами непосредственного взаимодействия океана с атмосферой, а глобальными процессами общей циркуляции вод Мирового океана. И, наконец, несколько десятков метров толщи вод, примыкающие к дну океана, образуют придонный пограничный слой, физические параметры которого зависят от рельефа дна, от трения о дно, от взаимодействия с главным термоклином.

Представление о непрерывном, плавном изменении с глубиной плотности, температуры, солености, других характеристик существовало довольно долго и не укладывалось в рамки сильно турбулизированного, хорошо перемешанного океана. И только с появлением зондирующей аппаратуры с высоким разрешением было обнаружено, что океан переслоен в значительно большей степени, чем это следует из предшествующих измерений. В океане и в большинстве природных водоемов существуют многочисленные четко выраженные слои, которые хотя и трансформируются в течение года, однако совсем не исчезают и не перемешиваются (рис. 8.4) [138]. Пунктирная линия на графике зависимости скорости звука от глубины соответствует зависимости скорости звука от давления (глубины) при постоянстве солености и температуры.

Поверхности раздела в океане существуют достаточно продолжительное время (месяцы, а в отдельных районах океана даже годы). Казалось бы, что диффузия и теплопроводность должны достаточно быстро сглаживать тонкоструктурные неоднородности. Однако этого не происходит. Эти структурные образования являются активными элементами, определяющими перенос энергии и вещества в океане. Явление долговременного существования протяженных слоев и разделяющих их высокоградиентных прослоек было открыто американским ученым Г. Стоммелом и членом-корреспондентом АН СССР К. Н. Федоровым и получило название тонкой термохалинной структуры вод океана [138]. В рейсе 1967 года они в серии тонких

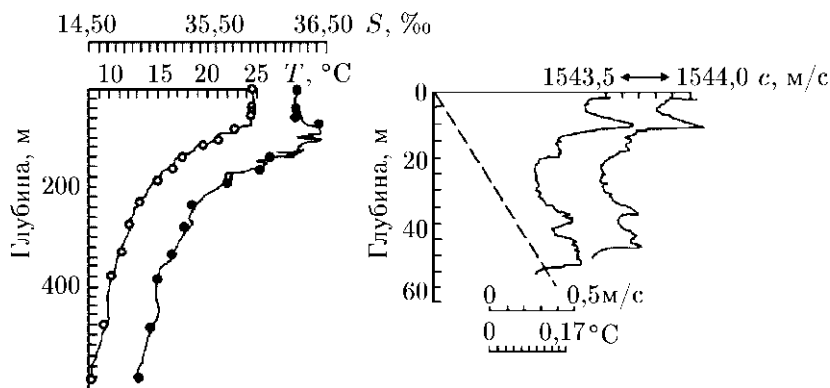


Рис. 8.4. Результаты измерения температуры T (левая кривая), солености S (правая кривая) и скорости звука c (профили получены с интервалом 10 мин) в верхнем квазиоднородном слое Индийского океана. Шкала скорости звука относится ко второму профилю

измерений зарегистрировали ступенчатую структуру морской воды Тиморского моря.

Причиной такой повсеместной переслоенности океанических вод является устойчивая стратификация, или устойчивое распределение плотности. Исследования со стратифицированными жидкостями показали, что для перемешивания жидкости с устойчивым распределением плотности по вертикали необходимы мощные внешние источники энергии. Вообще говоря, такие внешние источники энергии, которые работают в этом направлении, в океане есть — это ветер, обуславливающий ветро-волновое перемешивание, и конвекция в осенне-зимний период. Несмотря на то что эти источники довольно мощные, их мощности в лучшем случае хватает только на перемешивание ВКС и на увеличение его толщины, т. е. на увеличение глубины залегания СТ. Чаще же всего они приводят к возникновению хорошо перемешанных тонких слоев (вернее прослоек) воды, разграниченных друг от друга слоями с большими градиентами физических величин. Толщины их — от единиц сантиметров до десятков метров. Такие слои наблюдаются и в ВКС, и были зафиксированы на глубине 3 км.

Экспериментальное обнаружение тонкой термохалинной структуры океана и атмосферы является одним из наиболее важных открытий последних десятилетий XX века. Замечательной особенностью тонкой термохалинной структуры является ее устойчивость. Даже мощные циклоны, штормы, волны не

разрушают эти структуры, которые могут иметь горизонтальные размеры в сотни километров. Механизмы, приводящие к образованию таких структур, изучены недостаточно.

Если обозначить в момент времени τ в точке (x, y) мгновенное распределение по вертикали температуры $T_{x,y,\tau}(z)$, то для него можно записать

$$T_{x,y,\tau}(z) = \langle T(z) \rangle + T'_{L,\tau} + T''_{x,y,\tau}(z).$$

Аналогичные выражения можно записать для солености и плотности морской воды. Первый член с правой стороны — класс явлений, составляющих предмет классической океанографии; второй член — неоднородности, относящиеся к явлению тонкой термохалинной структуры; третий член — микротурбулентность по Рейнольдсу; L и τ — значения пространственных и временных масштабов, разграничивающих структурные элементы водных масс, обусловленные тонкой слоистой структурой и турбулентностью. Как правило, изрезанность вертикальных профилей солености больше, чем изрезанность температурных распределений. Морская вода обладает еще одним интересным свойством. Если в атмосфере скорости молекулярной диффузии тепла и влаги почти одинаковы, то скорости диффузии тепла и соли в океане разнятся на два порядка ($K_w^t = 1,4 \cdot 10^{-3}$ см²/с, $K_w^S = 1,04 \cdot 10^{-5}$ см²/с), что приводит к такому явлению как дифференциально-диффузионная конвекция, являющаяся одним из механизмов, обуславливающих формирование тонкой термохалинной структуры морских вод.

Конвекция в многокомпонентной среде, какой является океан (атмосфера, мантия Земли также являются такими средами), проявляется обычно в двух формах: в первом случае формируются горизонтальные высокоградиентные прослойки, во втором — возникают так называемые «солевые пальцы», представляющие собой тонкие вертикальные потоки. В однородной среде тепловая конвекция проявляется в виде вертикальных струй, или факелов [127]. Обе формы конвекции надежно зарегистрированы в океане. Кора и мантия Земли представляют собой многокомпонентную систему сложного состава, содержащую твердое вещество и флюид. Многие минералы сохранили следы конвекции в жидкой фазе. Многокомпонентная конвекция вызывает сложную вертикальную слоистую структуру звездных и планетных

атмосфер. Многокомпонентной конвекцией объясняется ячеистая структура фотосферы Солнца. Типичную для многокомпонентной конвекции слоистую структуру имеют облачные системы. Многокомпонентная конвекция является одним из наиболее распространенных природных явлений. Смена типа конвекции в природных условиях со слоистой на факельную или интрузионную часто сопровождается выделением большого объема растворенных газов, что приводит к катастрофическим явлениям. К таким явлениям относятся периодические выбросы углекислого газа из озер Ниос и Моноун (Камерун, 1984, 1986). Выброс углекислого газа из озера Ниос в августе 1986 г. привел к гибели более чем 1700 человек. Озеро Ниос расположено в кратере потухшего вулкана, его глубина равна 208 м, площадь около 2 км². Высокая концентрация углекислого газа в глубинных слоях приводит к формированию сложной стратифицированной слоистой структуры. На рис. 8.5 приведены вертикальные профили солености и температуры, измеренные на озере Ниос [175]. Рисунки хорошо передают слоистый характер распределения.

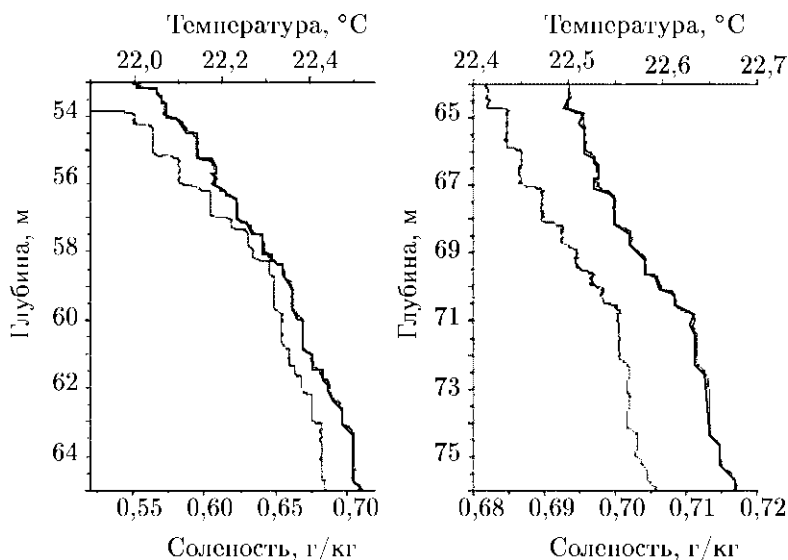


Рис. 8.5. Вертикальные профили температуры (жирная линия) и солености (тонкая линия), измеренные на озере Ниос в декабре 2002 г.

На рис. 8.6 приведены теневые фотографии конвекции над нагретым горизонтальным цилиндром в однородной жидкости и в линейно-стратифицированном растворе поваренной соли [151].

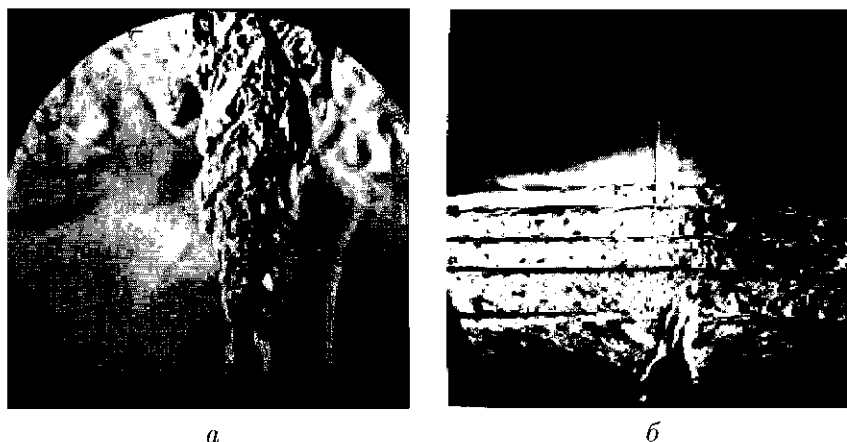


Рис. 8.6. Картина конвективных течений жидкости над нагретым горизонтальным цилиндром в однородной (а) и в стратифицированной (б) жидкости

Плотность стратифицированной среды

$$\rho(P, T, S) \approx \rho_0 (1 - \alpha \Delta T + \beta \Delta S)$$

зависит от солёности S и коэффициента солевого сжатия β , α — коэффициент теплового расширения. Стратификация характеризуется периодом плавучести

$$T_b = \frac{2\pi}{N} = 2\pi \sqrt{\frac{\Lambda}{g}},$$

где $\Lambda = \left| \frac{d \ln \rho}{dz} \right|^{-1}$ масштаб изменчивости плотности.

В однородной жидкости наблюдается всплывающая струя. По мере ее удаления от нагревателя (всплытия), хотя и скорость и температура струи убывают, движение становится турбулентным. Картина в стратифицированной среде принципиально другая — возникает сложная структура течений. Характерными элементами структуры многокомпонентной конвекции являются восходящий первичный факел и система конвективных ячеек. Разделяющие ячейки высокоградиентные прослойки представляют собой особый класс *внутренних пограничных течений*, отсутствующих в однородной среде [59, 148]. Конвективные ячейки излучают в среду внутренние волны пулевой частоты или диссипативно-гравитационные волны. На приведенных фотографиях

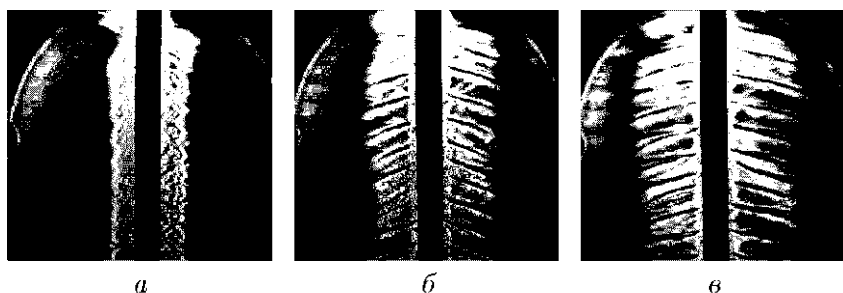


Рис. 8.7. Эволюция конвективного течения около плоского вертикального теплообменника при слабой стратификации: *а*, *б*, *в* — $\tau = 8, 20, 32$ мин соответственно

четко показано различие в характере конвективного движения в однородной и многокомпонентной средах. В зависимости от величины теплового потока и характеристик среды над точечным источником наблюдаются пять типов течений (диффузное, слоистое, ламинарно-слоистое, показанное на фотографии, пальцево-слоистое и интрузионное).

Описанные особенности картины многокомпонентной конвекции над цилиндром сохраняются и при переходе к точечному источнику тепла и при боковом нагреве устойчиво стратифицированной среды. На рис. 8.7 показаны теневые фотографии конвекции при боковом нагреве в линейно-стратифицированном растворе поваренной соли [149]. Среда слабо стратифицирована, период плавучести равен 33 с, масштаб температуры $\Delta T' = 0,7^\circ\text{C}$. В развитии термоконцентрационной конвекции от плоского источника тепла можно выделить три фазы: формирование высокоградиентных прослоек, замыкание вихревых ячеек в зоне охлаждения, установления течения и согласование его структуры. Картина сохраняется и при развитии конвекции от плоского источника холода. Скорость развития структур замедляется с уменьшением стратификации. В условиях данного опыта конвективные вихревые валы с шагом порядка высоты ячеек синхронно образуются спустя продолжительное время ($t = 5\text{--}7$ мин) после начала нагрева и постепенно трансформируются в конвективные ячейки (рис. 8.7, *а*, *б*). Эксперименты показали, что качественно структура течения при боковом охлаждении сохраняется и при фазовых переходах. Эти процессы играют определяющую роль при замерзании льда и таянии айсбергов.

Таким образом, как показывают данные натурных исследований, вертикальное распределение температуры и солености

имеет сложный характер, содержит большое количество структурных образований разных масштабов и различной природы. Исследование этих особенностей, механизмов их возникновения и трансформации является одной из важнейших задач гидрофизики.

Стратификация водных масс океана

Как упоминалось выше, океан — это в основном устойчиво стратифицированная среда, т.е. более плотные слои располагаются под менее плотными слоями. Чем больше вертикальный градиент, тем больше энергии нужно затратить для перемешивания морской воды. Слои воды с большими градиентами затрудняют перенос через них тепла, соли, микроорганизмов. Однако в отдельные отрезки времени некоторые слои океана могут быть и неустойчиво стратифицированными, например при ночном и осеннем охлаждении. В таком состоянии водная масса долго находиться не может, под действием силы Архимеда происходит перемещение более плотных частиц вниз. Скорость этих перемещений зависит от вертикального распределения плотности воды. Таким образом, для характеристики стратификации водных масс нужны какие-то величины.

Одной из таких величин является полная вертикальная устойчивость вод океана

$$E_z = \frac{g}{\rho_w} \frac{d\rho_w}{dz},$$

где ρ_w — плотность морской воды. При $E_z > 0$, $\frac{d\rho_w}{dz} > 0$ наблюдается устойчивая стратификация, при $E_z < 0$, $\frac{d\rho_w}{dz} < 0$ — неустойчивая стратификация.

Если процесс перемещения частицы воды по вертикали адиабатический (изменение плотности определяется адиабатическим градиентом плотности $\left(\frac{d\rho_w}{dz}\right)_A$), а изменение плотности среды определяется $\frac{d\rho_w}{dz}$, то возникает сила Архимеда, пропорциональная разности $\frac{d\rho_w}{dz} - \left(\frac{d\rho_w}{dz}\right)_A$. Эта сила и обеспечивает перераспределение водных масс по вертикали.

Стратификацию в устойчиво стратифицированных средах оценивают также величиной частоты Вайселя–Брента, имеющей вид

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_w} \left[\frac{d\rho_w}{dz} - \left(\frac{d\rho_w}{dz} \right)_A \right].$$

Здесь $\left(\frac{d\rho_w}{dz} \right)_A$ — адиабатический градиент плотности.

Для оценки относительного влияния градиентов солености и температуры на устойчивость вод градиенты плотности $\frac{d\rho_w}{dz}$

и $\left(\frac{d\rho_w}{dz} \right)_A$ можно выразить через вертикальные градиенты со-

лености и температуры [43]. Так как $\left(\frac{d\rho_w}{dP} \right)_A \sim \frac{1}{c_{зв}}$, где $c_{зв}$

скорость звука в морской воде, P — давление, то величину N^2 можно представить в виде

$$N^2 = -g^2 \left[\frac{d\rho_w}{dP} - \frac{1}{c_{зв}} \right].$$

Это выражение является предпочтительным, так как поле скорости звука в океане известно лучше, чем уравнение состояния для $\rho_w(T, S, P)$.

Термодинамические процессы в океане

Систему океан–атмосфера можно рассматривать как тепловую машину, где нагревателем служит океан, холодильником атмосфера, а в качестве рабочего вещества выступает водяной пар. Все процессы на Земле, сопровождающиеся тепловыми явлениями, описываются термодинамикой. При этом океан и атмосфера являются открытыми термодинамическими системами, т. е. неравновесными. Между этими системами на границе их раздела существуют потоки вещества и энергии, которые могут привести и приводят к формированию упорядоченных структур, т. е. к процессу самоорганизации открытых термодинамических систем. Такие структуры получили название диссипативных. Их изучение является предметом нелинейной неравновесной термодинамики, которая стала быстро развиваться с начала 70-х годов XX в. Общим для всех явлений образования упорядоченных структур при необратимых процессах в нелинейных открытых системах является совместное движение большого количества

(групп) молекул. Немецким ученым Хаккенем для таких процессов самоорганизации был предложен специальный термин синергетика (от греческого *synergia* — совместное или кооперативное действие). Физическая природа синергетики состоит в том, что в нелинейной области, вдали от равновесного состояния система теряет устойчивость, и малые флуктуации приводят к новому режиму, а именно к совокупному движению многих частиц. Совместное упорядоченное движение обеспечивает более эффективные энергетические потоки, чем молекулярные процессы. Описанные выше конвективные движения в многокомпонентной среде являются хорошим примером диссипативных структур. Важным моментом многокомпонентной конвекции является также смена режимов конвекции.

Самоорганизация диссипативных структур имеет место и в атмосфере, и в океане, а именно на границе их раздела, охватывая при этом пограничные слои — приводный пограничный слой атмосферы и приповерхностный слой океана. Второе начало термодинамики дает возможность пока лишь качественно описать формирование диссипативных структур, охватывая весь огромный пространственно-временной диапазон масштабов этих структур, начиная от микроструктурных образований до глобальных, определяющих климат и погоду.

Применительно к системе океан–атмосфера можно привести следующие примеры: микроконвективные ячейки Марангони, возникающие в миллиметровом поверхностном слое воды; крупномасштабные структуры, такие как облачные системы, ураганы и тайфуны, возникающие на границе раздела двух неравновесных сред; циркуляционные структуры Ленгмюра и термобар. Процессы формирования и эволюции неравновесных диссипативных систем до настоящего времени остаются малоизученными.

Находясь в термически неравновесном состоянии, океан и атмосфера обмениваются энергией и массой. И в атмосфере, и в океане при этом формируются условия, приводящие к возникновению крупномасштабных движений воздушных и водных масс, которые и составляют общую циркуляцию атмосферы и океана.

Циркуляции Ленгмюра, повсеместно наблюдаемые в широком диапазоне гидрометеорологических условий на поверхности морей и озер, также являются примером диссипативных структур. Возникновение циркуляций Ленгмюра обеспечивает более интенсивное вертикальное перераспределение тепла и импульса в приповерхностном слое водоема.

Циркуляции Ленгмюра, которые иногда называют также вихрями Ленгмюра, представляют собой разнонаправленные когерентные вихревые структуры с горизонтальными осями, параллельными направлению приводного ветра. Циркуляции Ленгмюра создают особый гидрофизический, гидрохимический и гидробиологический режимы в верхних слоях океанов, морей, озер и водохранилищ [12, 104].

Другим явлением, которое можно трактовать, как проявление диссипативных структур, является термический бар. В отличие от циркуляций Ленгмюра термобар обеспечивает перенос тепла в горизонтальном направлении из теплоактивной зоны в теплоинертную зону озера. Формирование термобара в пресных водосмах связано с аномальным состоянием пресных вод — максимальной плотностью вод при температуре $3,98^{\circ}\text{C}$. Термобар может формироваться в весенний и осенний периоды.

Глава 9

Динамика океана

Общая циркуляция атмосферы и вод океана

Систему океан–атмосфера можно рассматривать как тепловую машину с нагревателем — океаном, холодильником — атмосферой и рабочим веществом — водяным паром [156, 157]. Коэффициент полезного действия этой машины невелик. При разности температур ΔT между температурой поверхности океана T_s и атмосферы T_a на высоте образования облаков, равной 6 К, КПД паровой машины океан–атмосфера будет не более 2%. Вот эта часть тепла и преобразуется в механическую работу и расходуется на поддержание всех динамических процессов в атмосфере и океане — глобальной циркуляции воздушных и водных масс, течений, вихрей и т. д. Остальные 98% тепла идут на обеспечение стационарного термического состояния нашей планеты, т. е. на обеспечение стационарного климата.

Общей циркуляцией атмосферы называют систему устойчивых воздушных течений большого масштаба, размеров, сравнимых с размерами материков и океанов, и охватывающих значительные слои атмосферы. Формируется общая циркуляция в результате глобального (в масштабе всей Земли) взаимодействия океана и континентов с атмосферой. Такие явления, как волны в атмосфере, циклоны, муссоны и ряд других, следует рассматривать как возмущения общей циркуляции атмосферы, и относятся они к движениям среднего масштаба. Схема общей циркуляции атмосферы приведена на рис. 9.1. Подробное объяснение механизмов формирования потоков воздушных масс дано в гл. 12.

Под влиянием пассатов в области широт $\varphi = \pm 15^\circ$ образуются устойчивые пассатные течения, направленные на запад (рис. 9.2). Это так называемые Северное и Южное пассатные течения. Движущей силой этих течений является ветер. На глубине под Северным и Южными пассатными течениями существует обратный ток воды. Эти глубинные течения выходят на поверхность вблизи экватора вследствие малости скоростей ветра здесь и отсутствия силы Кориолиса. Так формируется Экваториальное противотечение.

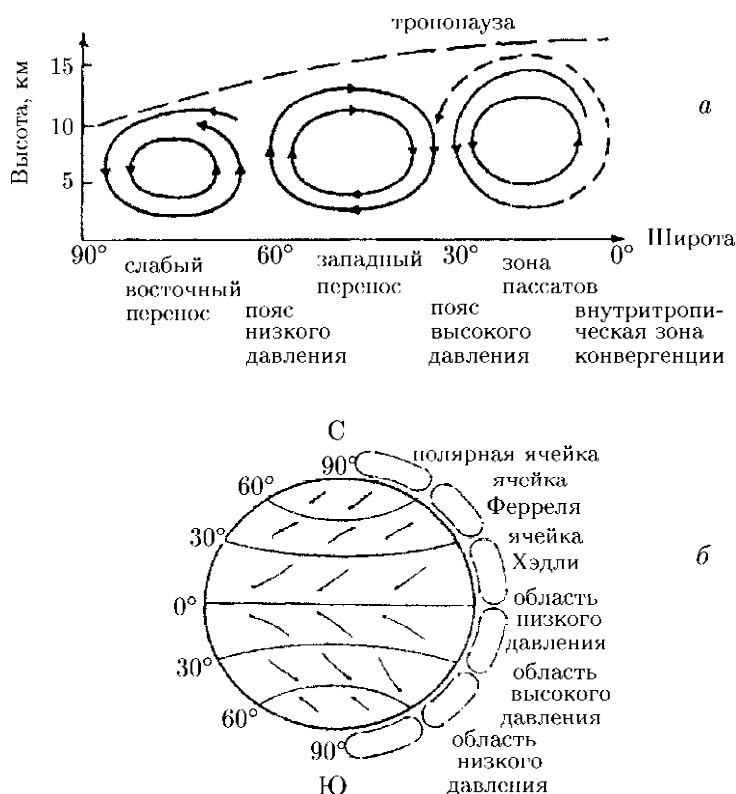


Рис. 9.1. Схема глобальной циркуляции атмосферы: а) высотный разрез; б) направление ветров

Причиной Экваториального противотечения являются также материки, в которые упираются пассатные течения. У восточных берегов материков пассатные течения обоих полушарий отклоняются к северу и к югу и движутся вдоль материков приблизительно до широт $\varphi = \pm 40^\circ$. Так начинаются мощные течения средних широт: Гольфстрим, Кurocio, Бразильское, Восточно-Австралийское, Мадагаскарское течения (рис. 9.2). Основной движущей силой этих течений является уже не ветер, как у пассатных течений, а напор воды у континентов. Разница уровней океана у западных и восточных берегов континентов составляет 60–70 см.

И еще одна особенность течений умеренных широт — они прослеживаются до глубин 1,5–2,0 км и только ниже обнаруживается слабое противотечение. Для чисто же ветрового течения

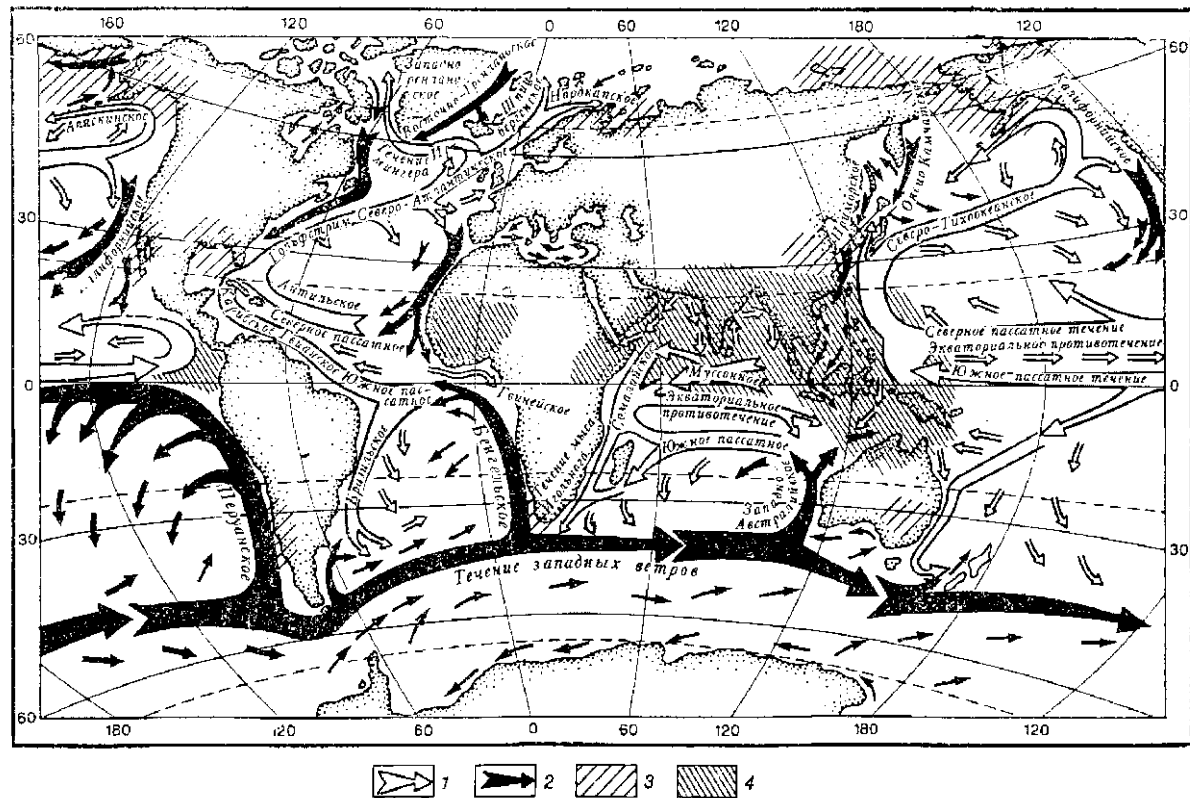


Рис. 9.2. Схема течений Мирового океана

(пассатного) обязательно наличие достаточно сильного противотечения. Таким образом, причиной возникновения устойчивых пассатных течений в океане является первая ячейка атмосферной циркуляции (ячейка Хэдли). Пассатные течения, в свою очередь, дают начало мощным теплым течениям умеренных широт. Эти течения, как упоминалось выше, движутся вдоль материков до широт $\varphi = \pm 40\text{--}45^\circ$, а затем поворачивают на восток, вновь пересекают океан, принося теплые воды в район широт $\varphi = \pm 60^\circ$. Если пассаты — восточные ветры, то на широтах $\varphi = \pm 60^\circ$ будут преобладать западные ветры. В Южном полушарии условия для беспрепятственного распространения этих ветров гораздо лучше, чем в Северном, так как там меньше континентов — препятствием служит только полоска Анд в Южной Америке. Поэтому западные ветры в Южном полушарии разгоняются до ураганной силы, а область, где они господствуют, получила название «ревущих сороковых». В Южном полушарии все западные течения сливаются в один кольцевой поток вокруг земного шара — Антарктическое циркумполярное течение, которое почти не имеет континентов на своем пути и подгоняется северо-западными ветрами.

Океанским течениям свойственно образовывать узкие, шириной всего в 100–300 км струи, текущие со скоростью ≈ 2 м/с, причем образование таких течений происходит не только в прибрежной зоне, но и вдали от берегов. Примером такой струи является Гольфстрим. Берегов у океанской струи нет, поэтому положение струи может меняться. Часто струя течения образует изгиб, перемещающийся по направлению течения. Такие изгибы называются меандрами (от названия реки Меандр в Малой Азии, которая течет по рыхлому грунту и очень часто меняет русло, размывая его). Меандрируя, течение может раздваиваться, отщеплять отдельные струи, создавать в океане круговороты диаметром несколько сот километров. Хорошо известным примером таких рингов являются ринги Гольфстрима, Куроисио [138]. Такие вихри медленно перемещаются по океану и не исчезают длительное время (рис. 9.3).

Вихревые движения присущи океану в значительно большей степени, чем это предполагалось на заре его исследований, когда считалось, что основная энергия океанических вод заключена в мощных стационарных крупномасштабных его течениях. Расчет течений очень труден, выполняется, в основном, численными методами [138]. До сих пор не удается воспроизвести все особенности действительной карты течений в океане.

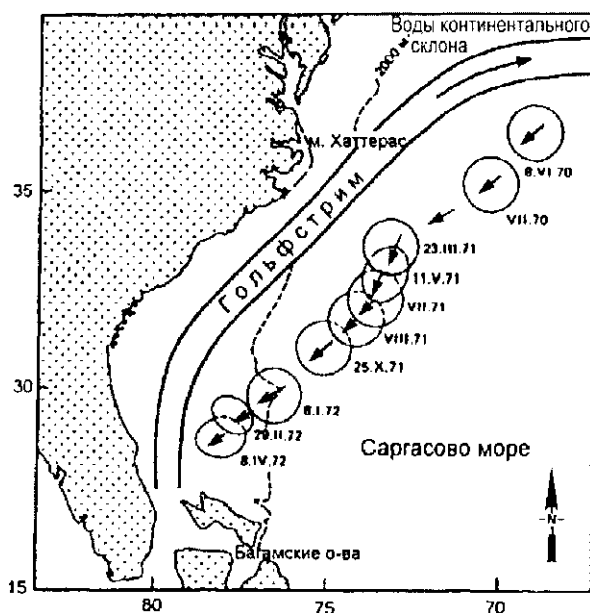


Рис. 9.3. Кольца Гольфстрима разрушаются медленно. Выделенное на рисунке кольцо существовало почти два года и разрушилось лишь на мелководье в районе подводного плато Блейк

Важной чертой циркуляции океанских вод является апвеллинг (upwelling) — подъем водных масс и даунвеллинг (downwelling) — опускание водных масс. Апвеллинг или даунвеллинг возникают у берегов при действии на значительной водной акватории касательного по направлению к берегу ветра. При таком направлении скорости ветра экмановский перенос водной массы может быть направлен к берегу (в этом случае возникает даунвеллинг) или от берега — в этом случае возникает апвеллинг. Рис. 9.4 поясняет механизм возникновения этого интересного явления. В зонах апвеллинга наблюдается подъем глубинных водных масс, богатых биогенными элементами.

Силы, действующие в океане, и уравнения динамики

Рассмотрев общую циркуляцию вод Мирового океана, мы практически упомянули все силы, действующие в нем.

Силы давления

Рассмотрим идеальную, т.е. невязкую жидкость и выделим в ней объем $dx\,dy\,dz$. Выберем следующую систему координат: ось X направлена на юг, ось Y — по параллели на восток, ось Z —

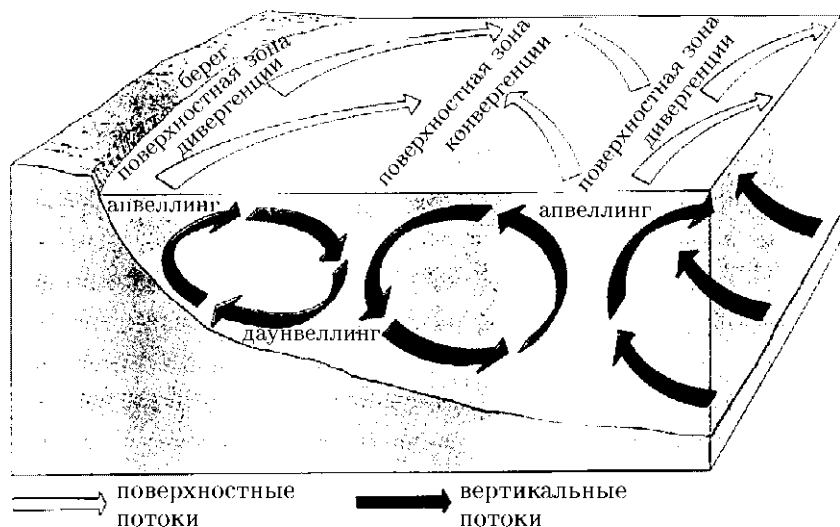


Рис. 9.4. Схема течений в прибрежной зоне в северном полушарии: общая схема циркуляции при апвеллинге и даунвеллинге

вертикально вверх. На выделенный объем в направлении оси X будет действовать сила

$$\left[P - \left(P + \frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz.$$

Если силу градиента давления отнести к единице массы, то для составляющих этой силы в направлениях координат X , Y , Z будут справедливы выражения

$$G_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}; \quad G_y = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}; \quad G_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g.$$

Выражение для G_z учитывает силу тяжести, направленную вниз.

Сила тяжести

Сила тяжести действует только в вертикальном направлении и вместе с силой давления даст суммарную силу G_z , действующую по вертикали. Если жидкость находится в статическом равновесии или движется горизонтально (без вертикальных ускорений), то $G_z = 0$ и тогда

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g,$$

или

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -g\rho,$$

т. е. в этом случае справедливо уравнение гидростатики.

Сила Кориолиса

В силу вращения Земли на каждую частицу жидкости, движущуюся со скоростью $\mathbf{V}$ по отношению к земной поверхности, действует сила Кориолиса. Отнесенная к единице массы эта сила имеет вид

$$\mathbf{F}^K = 2[\mathbf{V} \times \boldsymbol{\omega}],$$

где $\boldsymbol{\omega}$ — угловая скорость вращения Земли. Вектор $\boldsymbol{\omega}$ параллелен земной оси и направлен с юга на север. Раскрывая векторное произведение, получим составляющие силы Кориолиса, действующие по осям:

$$F_x^K = 2(v_y\omega_z - v_z\omega_y) = 2\omega v_y \sin \varphi,$$

$$F_y^K = 2(v_z\omega_x - v_x\omega_z) = -2\omega v_z \cos \varphi - 2\omega v_x \sin \varphi,$$

$$F_z^K = 2(v_x\omega_y - v_y\omega_x) = 2\omega v_y \cos \varphi.$$

Если выбрать систему координат в некоторой точке так, чтобы ось X была направлена на юг, ось Y — по параллели на восток, а ось Z — вертикально вверх, то получим

$$\omega_x = \omega \cos \varphi,$$

$$\omega_y = 0,$$

$$\omega_z = \omega \sin \varphi.$$

Здесь φ — широта географическая, т. е. угол между плоскостью экватора Земли и радиусом-вектором, проведенным из ее центра в рассматриваемую точку. В атмосфере и гидросфере $v_z \ll v_x$ и $v_z \ll v_y$, поэтому величиной v_z обычно пренебрегают и получают составляющие силы Кориолиса в виде

$$F_x^K = 2\omega v_y \sin \varphi,$$

$$F_y^K = -2\omega v_x \sin \varphi,$$

$$F_z^K = 2\omega v_y \cos \varphi.$$

Силы вязкости

Рассмотрим случай, когда скорость потока меняется только по координате Z , т. е. по высоте. В этом случае молекулы жидкости, переходя с горизонта $z + dz$ на горизонт z , будут переносить на этот горизонт то количество движения, которое они имели на горизонте $z + dz$. Соударяясь с молекулами на горизонте z , они будут сообщать им или отнимать у них дополнительное количество движения, что по закону Ньютона можно рассматривать как результат действия некоторой силы. Эта сила, отнесенная к единице поверхности, носит название напряжения молекулярного трения и записывается следующим образом:

$$\tau_m = \eta \frac{dV}{dz},$$

где η — коэффициент динамической молекулярной вязкости.

Для подсчета результирующей силы трения необходимо учесть влияние трения на выделенный объем жидкости со стороны как вышележащих, так и нижележащих слоев. Тогда можно записать:

$$\left[\left(\tau_m + \frac{d\tau_m}{dz} dz \right) - \tau_m \right] dx dy = \frac{d\tau_m}{dz} dx dy dz.$$

Отнеся эту величину к единице массы, т. е. поделив на $\rho dx dy dz$, получим

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\tau_m}{dz} = \frac{\eta}{\rho} \frac{d}{dz} \left(\frac{dV}{dz} \right) = \nu \frac{d^2 V}{dz^2},$$

где $\nu = \eta/\rho$ — коэффициент кинематической молекулярной вязкости. Так как для воды $\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$, то численные значения коэффициентов динамической и кинематической вязкости равны: $|\eta_w| = |\nu_w|$. Для воздуха это не так и $|\eta_a| \neq |\nu_a|$.

Если скорость потока есть функция всех трех координат, т. е. $V = V(x, y, z)$, то выражения для молекулярных сил трения будут иметь более сложный вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_m}{\partial x} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_m}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_m}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right).$$

Объединим теперь все, что сказано о силах, действующих на частицу воды. Согласно закону механики можно записать:

$$m\mathbf{a} = \sum \mathbf{F},$$

где m — масса, $\mathbf{a}$ — ускорение. Запишем этот закон применительно к объему жидкости единичной массы в декартовой системе координат:

$$\frac{dV_x}{dt} = \sum F_x,$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \sum F_y,$$

$$\frac{dV_z}{dt} = \sum F_z.$$

В левой части этих выражений стоят полные производные скорости по времени:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \frac{dz}{dt}.$$

Аналогичный вид имеют выражения для полных производных $\frac{dV_y}{dt}$ и $\frac{dV_z}{dt}$. Первый член в правой части выражения отражает чисто временное изменение скорости в данной точке. Второй и третий члены называют адвективными, четвертый член — конвективным.

Используя полученные выше выражения для действующих сил, запишем уравнение движения в векторном виде:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2[\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}] = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g\mathbf{k} + \nu \Delta \mathbf{V}. \quad (9.1)$$

Здесь $\mathbf{k}$ — единичный вертикальный вектор.

Без учета вязкости (идеальная жидкость) и силы Кориолиса уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g\mathbf{k}. \quad (9.2)$$

Это уравнение носит название уравнения Эйлера. Для вязкой несжимаемой жидкости было получено уравнение Навье–Стокса:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + g\mathbf{k} + \nu \Delta \mathbf{V}. \quad (9.3)$$

В уравнениях подлежат определению следующие неизвестные величины: P , V_x , V_y , V_z . Система незамкнута, так как уравнений три, а неизвестных четыре.

Уравнение неразрывности

Физический смысл уравнения неразрывности заключается в следующем: сумма массы, втекающей в единицу объема в единицу времени, и массы, вытекающей из того же объема за тот же промежуток времени, равна изменению массы, происходящему в единицу времени вследствие изменения плотности. Для нестационарного течения сжимаемой жидкости уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) = 0. \quad (9.4)$$

Если жидкость несжимаема, т.е. $\rho = \text{const}$, то уравнение неразрывности примет вид

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0. \quad (9.5)$$

Для решения задач динамики атмосферы и гидросферы необходимо также добавить уравнения состояния, так как плотность воздуха есть функция температуры, давления и влажности, а плотность воды — функция температуры, солености и давления:

$$\begin{aligned} P_a &= \rho_a R T_a, \\ \rho_w &= \rho(T_w, S, P). \end{aligned} \quad (9.6)$$

Таким образом, системы уравнений для атмосферы и океана содержат по пять уравнений каждая. Для решения поставленной задачи необходимо задать граничные и начальные условия. В качестве начальных условий задаются распределения по высоте (в воздухе) и по глубине (в океане) всех искомых функций в начальный момент времени. На поверхности раздела вода–воздух граничными условиями служат условия динамического и энергетического сопряжения. Корректное задание граничных и начальных условий представляет определенные трудности. Уравнения нелинейные и решение системы в полном виде сложно, а зачастую и невозможно.

Уравнение Навье–Стокса в виде (9.3) описывает движение вязкой несжимаемой жидкости и не учитывает турбулентный характер движения водных масс. Коэффициент молекулярной кинематической вязкости ν является физической константой и

не зависит от свойств самого потока. Значение ν зависит от температуры. При расчетах характеристик энерго-, тепло- и массообмена на границе раздела океан-атмосфера долгое время зависимость коэффициента молекулярной вязкости от температуры не учитывалась. В последней четверти XX в. Р. С. Бортковский показал, что это неправильно. Он занимался вопросами выноса воды из океана в атмосферу микрокаплями, которые образуются из-за схлопывания пузырьков газа, выходящих на морскую поверхность при обрушении волн в штормовых условиях. Естественно, что масса воды, выносимой в атмосферу таким механизмом, будет пропорциональна площади морской поверхности, покрытой «барашками», а эта характеристика при прочих равных условиях оказалась зависящей от вязкости морской воды, для которой разница значений в полярных и теплых морях весьма существенна.

Выше уже говорилось, что течения вод Мирового океана носят турбулентный характер. Для количественного описания развитого турбулентного движения, в котором физические величины испытывают, на первый взгляд, беспорядочные колебания, Рейнольдсом были получены уравнения, носящие ныне его имя.

Рейнольдс предположил, что мгновенную скорость потока, наблюдаемую во времени в данной точке пространства, можно записать в виде суммы двух членов:

$$\mathbf{V} = \overline{\mathbf{V}} + \mathbf{V}',$$

где $\overline{\mathbf{V}}$ — осредненная составляющая вектора скорости, $\mathbf{V}'$ — его пульсационная составляющая. Введя такую форму записи составляющих скорости потока, Рейнольдс подставил предложенную им форму записи мгновенной скорости потока в уравнения Навье–Стокса и, проведя их осреднение, получил систему уравнений для определения средних значений составляющих скорости турбулентного потока:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 V_i + \frac{a}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho V'_i V'_j \right). \quad (9.7)$$

Индексы i, j принимают значения x, y, z . Как видим, в уравнениях появились новые члены вида $-\rho V'_i V'_j$. Они характеризуют потоки импульса, обусловленные турбулентным характером движения в среде. Влияние турбулентности эквивалентно дополнительному воздействию силового характера.

Появление дополнительных членов в уравнениях динамики делают систему уравнений незамкнутой и использованием только уравнения неразрывности замкнуть ее нельзя. Для замыкания

системы уравнений широко используется гипотеза, позволяющая выразить турбулентные потоки переносимого свойства через их осредненные градиенты по аналогии с процессами молекулярного переноса. В общем случае коэффициенты турбулентного обмена представляют собой тензоры. При скалярном обмене, чем обычно и ограничиваются при решении практических задач, гипотеза записывается в виде

$$\bar{\rho} V'_k s' = -\rho k_j \frac{\partial \bar{s}}{\partial x_i},$$

где ρ — плотность, s — переносимое свойство, k_j — коэффициент турбулентного обмена.

Вводимые таким образом коэффициенты турбулентного обмена не являются физическими постоянными, а зависят от структуры, кинематики и масштабов турбулентного движения, характера исследуемого процесса и его масштабов. Проблема замыкания системы уравнений переносится на задание коэффициентов турбулентного обмена, что в значительном числе случаев сделать проще, чем задание самих турбулентных потоков. Проблема замыкания системы уравнений турбулентного переноса импульса, тепла, влаги и соли не решена окончательно до сих пор.

Упрощение системы уравнений

При решении отдельных конкретных задач система уравнений динамики, как правило, может быть упрощена, поскольку при рассмотрении и описании конкретных явлений далеко не все члены в уравнениях равнозначны и некоторыми из них можно пренебречь. Рассмотрим наиболее употребляемые упрощения.

Приближение Буссинеска

Будем считать, что плотность воды определяется только ее температурой. В этом случае справедливо соотношение

$$\rho = \rho_0(1 - k_T T')$$

(здесь ρ_0 — некоторое среднее значение плотности, определяемое средним значением температуры T_0 , T' — отклонение температуры от T_0 , $k_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dT} \right)_\rho$ — коэффициент теплового расширения жидкости). Подставим это выражение в уравнение (9.3)

и представим давление P в виде суммы $P = \tilde{P} + P'$, где $\tilde{P}$ определяется уравнением статики

$$\nabla \tilde{P} = -\rho_0 g,$$

P' — отклонение давления от этого значения. После несложных преобразований уравнение (9.3) можно переписать в виде

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P' + \nu \Delta \mathbf{V} + g k_T T' \mathbf{k}. \quad (9.8)$$

Такая форма записи уравнения (9.8) носит название приближения Буссинеска и используется при описании конвективных процессов.

Геострофическое приближение

В природе имеют место случаи, когда движение водных или воздушных масс формируется под действием двух сил — силы градиента давления ∇P и силы Кориолиса. Остальные силы в этих ситуациях много меньше и ими можно пренебречь. Тогда уравнения движения примут вид

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2\omega V_y \sin \varphi &= 0, \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - 2\omega V_x \sin \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (9.9)$$

Отсюда можно определить скорости V_x и V_y , которые называются составляющими геострофического течения. Это приближение оказывается достаточно хорошим для скорости ветра выше 1,5 км, т. е. выше пограничного слоя, где уже не сказывается влияние сил трения о земную поверхность, и для глубинных течений в океане. Разность между действительным течением и геострофическим называется агеострофическим отклонением.

Градиентные течения

Если рассматривать мощные вихревые системы в атмосфере это циклоны, антициклоны, ураганы, смерчи, в океане — ринги крупных течений, синоптические вихри, то траектории движения частиц в таких системах существенно криволинейны и весьма значимой при этом становится центробежная сила. Уравнения движения для таких систем обычно записываются в цилиндрической системе координат. Уравнение движения для

радиальной составляющей скорости в вихревой системе будет иметь вид

$$\frac{V_{\varphi}^2}{r} + 2\omega V_{\varphi} \sin \varphi - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = 0. \quad (9.10)$$

Здесь V_{φ} — тангенциальная составляющая скорости, r — направление по радиусу вихревой системы. Движение, описываемое этим уравнением, носит название градиентного течения для океана и градиентного ветра в атмосфере.

Циклострофическое движение

Если диаметр вихревой системы небольшой (например, смерчи), то влиянием силы Кориолиса можно пренебречь и тогда уравнение (9.10) примет вид

$$\frac{V_{\varphi}^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = 0. \quad (9.11)$$

В этом случае принято говорить, что движение находится в циклострофическом балансе.

Баротропное приближение

Жидкость называется баротропной, если ее плотность ρ_w является функцией только от давления P .

Бароклинное приближение

Жидкость, плотность которой зависит не только от давления, но и от температуры и солености, называется бароклинной.

Баротропное и бароклинное приближения позволяют решить ряд конкретных задач в метеорологии и гидрофизике.

Все перечисленные выше упрощения употребляются и при рассмотрении жидкостей, находящихся в турбулентном режиме движения.

Основные типы течений в океане

В зависимости от причин, порождающих течения, последние подразделяются на дрейфовые, градиентные, конвекционные, приливные, суспензионные [116, 157]. Иногда выделяют течения, вызванные сейсами и волнами цунами.

Дрейфовые течения

Силой, вызывающей дрейфовое течение, является сила трения $F_{\text{тр}}$ воздушного потока о подстилающую водную поверхность. Рассмотрим случай установившегося движения в бесконечно глубоком море и будем считать, что плотность воды всюду

постоянна и вода несжимаема. В этом случае уравнения динамики примут вид

$$\begin{aligned}\nu \frac{d^2 V_x}{dz^2} + 2\omega V_y \sin \varphi &= 0, \\ \nu \frac{d^2 V_y}{dz^2} + 2\omega V_x \sin \varphi &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0.\end{aligned}\tag{9.12}$$

Граничные условия на поверхности задаются следующим образом:

$$\begin{aligned}\rho \nu \left(\frac{dV_x}{dz} \right) \Big|_{z=0} &= F_{\text{тр}}, \\ \rho \nu \left(\frac{dV_y}{dz} \right) \Big|_{z=0} &= 0.\end{aligned}\tag{9.13}$$

Ось X направлена по ветру.

Решение системы уравнений (9.12) с граничными условиями (9.13) будет иметь вид

$$\begin{aligned}V_x &= V_0 e^{-az} \sin(45^\circ - az), \\ V_y &= V_0 e^{-az} \sin(45^\circ - az), \\ V_0 &= \frac{\sqrt{2} F_{\text{тр}}}{\rho \nu a}, \quad a^2 = \frac{\omega \sin \varphi}{\nu}.\end{aligned}\tag{9.14}$$

Абсолютная величина скорости дрейфа V_0 на поверхности океана прямо пропорциональна силе трения $F_{\text{тр}}$. Направление же дрейфового течения на поверхности океана не совпадает с направлением ветра и составляет с последним угол 45° . Это отклонение определяется действием силы Кориолиса. По мере увеличения глубины z абсолютная величина вектора скорости дрейфового течения уменьшается по экспоненциальному закону, а сам вектор все более и более поворачивается вправо (в северном полушарии). На некоторой глубине $z = D$ вектор скорости дрейфового течения будет направлен в сторону прямо противоположную направлению вектора скорости дрейфового течения на поверхности океана. Из (9.14) следует, что

$$D = \pi \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin \varphi}}.$$

Глубина D получила название глубины трения. На горизонте, равном удвоенной глубине трения, направления векторов скорости дрейфового течения на этой глубине и на поверхности океана совпадут. Если глубина водоема в рассматриваемом районе больше глубины трения, то такой водоем следует считать бесконечно глубоким. Вблизи экватора $\varphi \cong 0^\circ$, $\sin \varphi \rightarrow 0$ и, следовательно, $D \rightarrow \infty$. Таким образом, в приэкваториальной зоне Мирового океана глубины, вне зависимости от их реального значения, следует считать малыми и рассматривать дрейфовые течения как течения в неглубоком море.

Дрейфовые течения наблюдаются и в северных морях, где поверхность воды покрыта льдом. В данной ситуации плавающие ледяные поля за счет трения увлекают за собой водные массы.

Чисто дрейфовые течения могут реализовываться только в районах открытого океана вдали от берегов. В прибрежных же областях дрейф приводит к понижению или повышению уровня воды, что является одной из причин возникновения так называемых градиентных течений.

Градиентные течения

Течения в океане часто возникают под действием силы градиента давления. Можно выделить следующие причины возникновения силы градиента давления:

- сгон или нагон воды;
- возникновение зон конвергенции или дивергенции водных потоков;
- подъем или опускание уровня воды за счет изменения стока рек;
- неоднородное горизонтальное распределение плотности, что возможно при вторжении в море водных масс, плотность которых отлична от плотности окружающей воды.

Допустим, что в некоторый момент времени работа ветра прекратилась, но она создала наклон поверхности, который и обусловит возникновение градиентного течения. Возникшее таким

образом течение можно описать уравнениями

$$\begin{aligned}\nu \frac{d^2 V_x}{dz^2} + 2\omega V_y \sin \varphi &= 0, \\ \nu \frac{d^2 V_y}{dz^2} - 2\omega V_x \sin \varphi + g \sin \gamma &= 0, \\ \operatorname{div} \mathbf{V} &= 0,\end{aligned}\tag{9.15}$$

где γ — угол наклона морской поверхности вдоль направления действия ветра. Граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\left(\frac{dV_x}{dz} \right) \Big|_{z=0} &= \left(\frac{dV_y}{dz} \right) \Big|_{z=0} = 0, \\ V_x \Big|_{z=H} &= V_y \Big|_{z=H} = 0.\end{aligned}\tag{9.16}$$

Для градиентных течений, так же, как и для дрейфовых, существует глубина трения, но отсчитывается она не от поверхности, а от дна и называется нижней глубиной трения (обозначается D'). Выше D' толща воды движется в одном и том же направлении перпендикулярно действующему градиенту давления. В этом и состоит отличие градиентного течения от дрейфового, которое с глубиной затухает.

Таким образом, движение вод Мирового океана по вертикали можно разбить на три главные части:

- придонное течение в слое от дна до горизонта D' , скорости которого различны по величине и направлению;
- основное, или глубинное течение, охватывающее глубины от D' до поверхности; скорость в этом слое практически не меняется с глубиной;

поверхностное течение, скорость которого равна сумме чисто дрейфового и глубинного течений; поверхностное течение проникает до глубины $z = D$.

Примером градиентных течений являются бароградиентные течения, обусловленные различием атмосферного давления над отдельными участками Мирового океана. В отличие от дрейфовых бароградиентные течения распространяются до дна и изменяются с изменением поля атмосферного давления. Для

описания бароградиентных течений используются системы уравнений (9.12) и (9.15). Система уравнений (9.15) служит также и для описания так называемых суспензионных, или мутьевых потоков, которые возникают при стекании по склону подводных гор водных масс с большим содержанием илистых наносов. Суспензионные потоки наблюдаются также в устьях больших рек при их впадении в моря и океаны.

Одной из разновидностей градиентных течений являются конвекционные течения. Они возникают вследствие различия плотности морской воды на одной и той же глубине, что создает действующий горизонтальный градиент давления.

Дальнейшее развитие теории морских течений связано с учетом топографии морского дна. В условиях крупномасштабных неоднородностей морского дна при расчете течений необходимо учитывать эффект бокового трения. Особенно большую роль сила бокового трения играет в мощных морских течениях, вторгающихся в виде струи в окружающие воды Мирового океана.

Глава 10

Волны в океане

Волновые движения в океане

Одна из особенностей Мирового океана, приводящая к возникновению необычайно зрелищного и интересного явления, заключается в наличии свободной границы океана, которая энергетически прозрачна, легко деформируема и подвижна. Эта особенность приводит к возникновению и развитию морских гравитационных поверхностных волн, которые возникают под действием ветра и являются наиболее очевидным проявлением динамического взаимодействия океана и атмосферы. В качестве силы, возвращающей в положение равновесия водную поверхность, выступает сила тяжести. Роль возвращающей силы может играть и сила поверхностного натяжения — при этом возникают поверхностные капиллярные волны. Мелкая рябь, возникающая на поверхности пруда или лужи при порывах ветра, имеет именно такую природу.

Однако наряду с поверхностными гравитационными и капиллярными волнами в океане существует множество других видов волн, которые играют важную роль в динамике океана. Гравитационные волны возникают благодаря действию силы тяжести на частицы воды, отклоненные от положения равновесия. Сила тяжести возвращает их в исходное положение. Такие равновесные положения могут быть связаны со свободной поверхностью или внутренней геопотенциальной поверхностью в стратифицированной жидкости.

Подобно тому, как поверхностные волны существуют на границе вода–воздух, на границе раздела вод разной плотности будут существовать внутренние гравитационные волны. Образование внутренних волн происходит не только при скачкообразном изменении плотности, но и при ее непрерывном распределении по глубине. Возникновение внутренних волн можно представить себе следующим образом. Если в покоящейся стратифицированной среде возникло возмущение, которое вывело частицу воды из состояния равновесия, то возникает возвращающая сила, равная равнодействующей архимедовой силы и силы тяжести, вызывающая колебания около положения равновесия.

Распространение этих колебаний в среде и представляет собой внутренние волны. Амплитуда волн этого типа в океане может достигать сотни метров, длина волны — многие километры, но колебания водной поверхности при этом будут ничтожны. Образование внутренних волн происходит под действием приливов, колебаний атмосферного давления, изменений поля приводного ветра, неустойчивости течений. Внутренние волны в океане имеют самые разнообразные формы — от почти синусоидальных до солитонобразных. Поверхностные течения, индуцированные внутренними волнами, оказывают сильное воздействие на короткие поверхностные волны, перераспределяют поверхностно-активные вещества на морской поверхности. Образующаяся на поверхности зона выглаживания, так называемый слик, или наоборот зона повышенной интенсивности волнения, или сулой, в которой наблюдается обрушение волн, имеют форму вытянутых полос, распространяющихся вместе с группами внутренних волн. По этим проявлениям на поверхности океана внутренние волны и обнаруживаются. Так как поверхностные гравитационно-капиллярные волны, поверхностно-активные вещества сильно влияют на коэффициент отражения электромагнитных, в том числе световых волн, внутренние волны хорошо обнаруживаются дистанционными методами, например, они видны из Космоса. Внутренние волны по сравнению с обычными поверхностными гравитационными волнами обладают рядом удивительных свойств. Например, групповая скорость внутренних волн перпендикулярна фазовой, угол отражения внутренних волн от откоса не равен углу падения [73, 63].

При рассмотрении крупномасштабных явлений в Мировом океане необходимо учитывать эффекты вращения Земли, изменение глубины и наличие берегов. Учет этих факторов обуславливает возможность существования особых типов волн в океане. Сила Кориолиса является причиной возникновения инерционных или гироскопических волн. Если во вращающейся системе координат частица воды движется с некоторой скоростью, то сила Кориолиса, действующая по нормали к скорости частицы, обуславливает возникновение дополнительного движения по окружности. Однако частица не может двигаться независимо. Образующийся градиент давления совместно с силой Кориолиса приводит к возникновению волновых движений. Если наряду с силой Кориолиса важную роль играет сила тяжести, то возникают гравитационно-гироскопические волны.

Изменение географической широты обуславливает изменение вертикальной составляющей частоты вращения, это приводит к

образованию так называемых планетарных волн Россби, которые локализируются в узкой экваториальной зоне и охватывают всю водную толщу. Экваториальная зона играет роль своеобразного волновода. Периоды волн Россби составляют десятки суток, длины волн достигают тысяч километров. Боковые границы и изменение глубины на шельфе приводят к существованию нескольких типов береговых захваченных волн — шельфовых, краевых, Кельвина, топографических волн Россби. В возникновении этих волновых движений важна роль силы тяжести и равновесной потенциальной завихренности. Береговые захваченные волны оказывают существенное влияние на перемещение наносов и загрязнений, формирование берегов и течения.

Крупномасштабные волны типа волн Россби, Пуанкаре, Кельвина оказывают существенную роль на термогидродинамику океана, взаимодействие атмосферы и океана, климат и погоду. Свойства многих этих волн существенно отличаются от свойств поверхностных гравитационных волн. Например, волны Кельвина локализованы в узкой шельфовой зоне и распространяются в Северном полушарии вдоль берега против часовой стрелки. Экваториальные волны Россби, имея пространственные масштабы в сотни километров, локализируются вдоль экватора и проявляются не в изменении уровня моря, а прежде всего, в форме вихревых течений, для них не имеет места равенство потенциальной и кинетической энергий.

Сжимаемость жидкости приводит к существованию в океане акустических волн, а электропроводность и магнитное поле Земли обуславливают возникновение волн Альвена.

Если изобразить спектр (зависимость волновой энергии E от волнового периода T) гидродинамических волновых движений в океане, то он будет иметь вид, представленный на рис. 10.1 [73]. На спектре хорошо прослеживаются волновые колебания разных масштабов и периодов: область капиллярных и гравитационно-капиллярных волн, ветровые волны, зыбь, длинные гравитационные волны и цунами, приливные волновые периоды, инерционные периоды и планетарные волны.

Основные факторы, обуславливающие волновые движения в океане

Перечислим основные причины, вызывающие волновые движения в океане. К таким причинам, прежде всего, следует отнести:

- гравитационные силы;

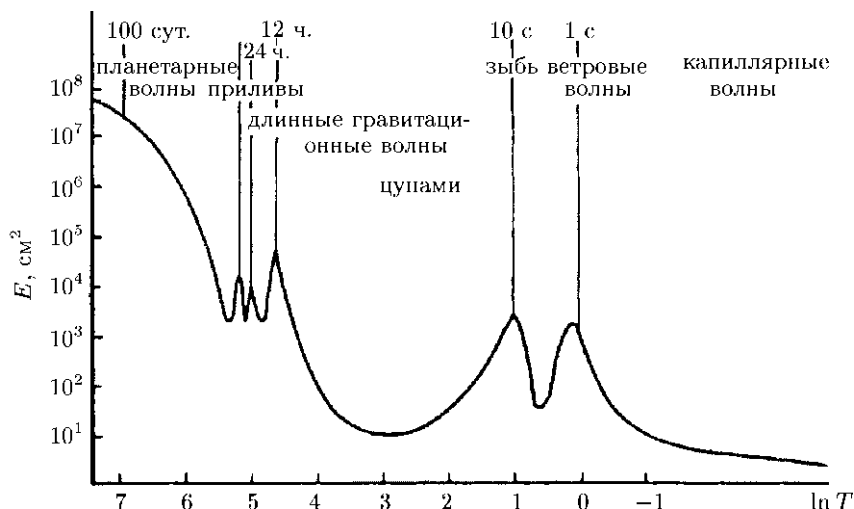


Рис. 10.1. Схематическое изображение энергетического спектра возмущений, соответствующих разным типам волн в океане

силы поверхностного натяжения;

- приливообразующие силы, имеющие гравитационную природу;
- трение ветрового потока о водную поверхность или тангенциальное напряжение ветра;
- вращение Земли;
- топография морского дна.

Для *гравитационных волн* существенны сила тяжести, наличие свободной поверхности, неоднородность среды по плотности, сферичность Земли, ее вращение и взаимодействие с Луной и Солнцем (приливообразующие силы).

Для *ветровых волн* наиважнейшими являются воздействие ветра на водную поверхность и сила тяжести. В начальный момент развития волнения или при слабом ветре и малом разгоне (т. е. при малых размерах части водоема, на которую воздействует ветер) существенны также силы поверхностного натяжения. Такие факторы, как сжимаемость среды и неоднородность ее по плотности, а также сферичность и вращение Земли для ветровых волн несущественны.

Для *внутренних волн*, которыми буквально пронизана почти вся толща вод Мирового океана, существенно наличие изменения плотности в поле силы тяжести. Наличие же свободной границы не важно.

Для *длинных приливоотливных волновых движений* существенно гравитационное взаимодействие Луны и Солнца с учетом их вращения.

В возникновении *волн Россби* существенную роль играет изменение равновесной потенциальной завихренности, а сила Кориолиса обуславливает образование инерционных волн.

Обычно по виду возвращающей силы выделяется пять основных типов волн: звуковые, капиллярные, гравитационные, инерционные и планетарные. В природе действие сил происходит одновременно, однако, в зависимости от масштаба явлений роль сил различна, и поэтому образуются самые разные типы волновых колебаний в соответствии с ролью преобладающих сил.

Таким образом, спектр волновых движений в океане весьма разнообразен, исследование волновых явлений составляет целый раздел физики моря. Познакомиться со всеми типами волновых движений в океане в рамках краткого курса не представляется возможным. Поэтому несколько подробнее ознакомимся с некоторыми особенностями морских ветровых волн, приливов, цунами.

Морские ветровые волны

Изучение закономерностей ветрового волнения интересно не только с позиций фундаментальной науки, но и с позиций практических запросов, таких, например, как мореплавание, строительство гидросооружений, портовых комплексов, расчет технического оснащения нефте- и газопромыслов на шельфе. Около 80% разведанных запасов нефти и газа сосредоточено на дне океанов и морей, и сооружение морских платформ и морское бурение требуют надежных данных о режиме ветрового волнения. Знание предельных размеров волн в различных акваториях Мирового океана необходимо и для обеспечения безопасности судоходства в этих местах.

Ветровые волны — явление, которое проявляется на поверхности любого водоема. Масштаб же этого явления для различных водоемов будет разным. Леонардо да Винчи в свое время писал: «... волна бежит от места своего возникновения, а вода не двигается с места. Наподобие волн, образуемых в море на пивах течением ветров, волны кажутся бегущими по полю, между тем нивы со своего места не сходят». Эта особенность ветровых волн

имеет колоссальное практическое значение: если бы вместе с формой, т. е. волной, перемещалась еще и масса, т. е. вода, то ни один корабль не мог бы двигаться против волнения.

Ветровое волнение обычно разделяют на три типа:

ветровые волны, которые находятся под непосредственным действием ветра;

волны зыби, которые наблюдаются после прекращения ветра или после выхода волн из зоны действия ветра;

- смешанное волнение, когда ветровые волны накладываются на волны зыби.

Поскольку ветры над океанами и морями, особенно в умеренных широтах, изменчивы по скорости и направлению, ветровое волнение пространственно неоднородно и существенно изменчиво во времени. При этом волновые поля еще более неоднородны, чем ветровые, так как волны могут прийти в тот или иной район одновременно из разных (различно расположенных) зон зарождения.

Если внимательно смотреть на морскую взволнованную поверхность, то можно прийти к выводу, что волны сменяют друг друга без какой-либо видимой закономерности — за большой волной может придти еще большая, а может и совсем маленькая волна; иногда приходят несколько больших волн подряд, а порой между волнами расположен участок почти спокойной поверхности. Большая изменчивость конфигурации взволнованной поверхности моря, особенно в случае смешанного волнения (а это наиболее распространенная ситуация) дала повод известному английскому физiku лорду Томсону заявить, что «... основной закон ветрового волнения — это кажущееся отсутствие какого-либо закона». И, действительно, до настоящего времени мы не можем со всей определенностью предсказать последовательность чередования индивидуальных волн даже по какой-либо одной из характеристик, например по высоте, не говоря уже о других характеристиках, таких как форма гребней и ложбин и др.

При сложении двух гармонических колебаний, частоты которых достаточно близки, возникает негармоническое колебание, называемое биением, которое характеризуется периодическим изменением интенсивности с частотой, равной разности взаимодействующих колебаний (рис. 10.2). нечто аналогичное наблюдается и в ветровых волнах. Поскольку волны приходят в какую-либо область из разных зон и частоты их могут быть

близки, возникают волновые колебания морской поверхности, аналогичные биениям в механических системах и получившие применительно к волнам название групп волн или волновых пакетов (рис. 10.2). Если измерить спектр возмущений морской поверхности в этом случае, то он будет бимодальным, т. е. будет иметь два максимума на близких частотах. А если нарисовать огибающую группы волн и провести ее спектральный анализ, то спектр огибающей будет иметь четкий максимум на частоте, равной разности частот максимумов спектра $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$. Между группами волн наблюдается почти гладкая морская поверхность.

Человека давно занимает вопрос сколько волн в группе, и какая волна в ней наибольшая? Древние греки считали, что в группах по 3 волны и наибольшая — третья; финикийцы и египтяне — 4–5 волн; римский поэт Овидий Назон полагал, что наибольшей волной в группе является десятая, а на Востоке считали, что самая высокая волна одиннадцатая. Но самое большое распространение получило мнение о наибольшей девятой волне в группе — отсюда и выражение «девятый вал», название знаменитой картины Айвазовского.

Однозначного ответа на эти два вопроса нет до сих пор. Ленинградские ученые на основе анализа и обобщения большого числа записей волнения в разных экспедициях построили [39] функцию распределения количества ветровых волн в группе (табл. 10.1) для волнения различной

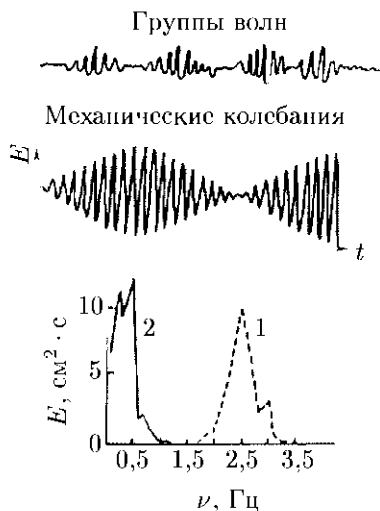


Рис. 10.2. Группы волн

Таблица 10.1

Число волн в группе	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Функция распределения, %	90	70	50	45	30	20	10	8	5	3	2	1	0,5

интенсивности (высоты волн менялись в пределах $h = 0,2\text{--}4,5$ м). Из таблицы видно, что на самом деле девятый вал составляет только 10% всех групп волн, а 50% групп волн состоят из 5 волн. Но встречаются волновые пакеты и с 15 волнами — всего 0,5% всех случаев. Чем больше волн в группе, тем выше в ней наибольшая волна. Группы в 5–6 волн часты и не опасны, группы в 8–10 волн не так уж редки и имеют достаточно высокую максимальную волну. Наибольшие известные волны в океане превышают по высоте 25–30 м, в морях они больше 15–20 м. В табл. 10.2 приведены некоторые параметры волн для различных районов Мирового океана.

Таблица 10.2

Океаны и моря	Средняя многолетняя повторяемость волн, высотой > 6 м	Предельно возможная высота волн (1 раз в 30 лет)
Северная Атлантика	18%	20 м
Южная Атлантика и Индийский океан	20%	23 м
Северная часть Тихого океана	17%	21 м
Тропики Тихого океана	3–5%	12–16 м
Северное, Берингово, Охотское моря	8%	16 м
Норвежское, Баренцево, Гренландское моря	8%	12 м
Балтийское, Босфор, Японское моря	2%	12 м
Восточно-Китайское и Южно-Китайское моря	2%	12 м
Средиземное, Черное, Каспийское моря	3%	12 м
Красное море	1%	9 м

Знание режимов ветрового волнения необходимо мореплавателям. Особую опасность для судов представляет трансформация волн на течениях [61, 69]. С этой точки зрения печальную

известность имеет юго-восточный район побережья Африки — здесь сильные ветры, разгоняющие большие волны, зыбь, приходящая с юга, и Северное течение — все это создает необычайно тяжелые условия для плаванья. Бартоломео Диаш, об экспедиции которого уже упоминалось, в этом районе оксана две недели противостоял сильному волнению и, чтобы пройти это место, по легенде, продал душу дьяволу. В тот раз это помогло. Диаш прошел это место, назвал его мысом Бурь, но через два года погиб там же. Португальский король Жоан II переименовал мыс Бурь в мыс Доброй Надежды, так как за ним открывалась надежда дойти до Индии морским путем. Именно с этим мысом связано возникновение легенды о «Летучем голландце». Именно здесь наблюдаются одиночные волны-убийцы, образующиеся в результате взаимодействия волн и течений. Эти волны представляют крутое вспучивание воды, имеют очень крутой передний склон и достаточно пологую ложбину. Высота их может превышать 15–20 м, при этом они возникают часто при относительно спокойном море. Волны этого района представляют серьезную опасность и для современных судов. Большую опасность представляют также волны в тропических ураганах и тайфунах.

Наука о волнах возникла и развивалась как один из разделов классической гидродинамики и до 50-х годов XX в. практически не приступала к описанию такого сложного волнения, каким являются ветровые волны на поверхности водосмов. Степень волнения оценивалась главным образом по шкале Бофорта на глазок (табл. 10.3).

В начале XX в. с переходом от парусного флота к паровому количество аварий и гибели кораблей несколько уменьшилось (было 250–300 судов в год, стало ~150), и появилась недооценка природных сил при определении безопасности мореплавания. Среди судостроителей начала XX в. бытовало мнение, что «силы стихии сдаются перед новыми прочными кораблями». Это мнение стоило жизни многим морякам. Морские волны — достаточно грозное явление природы, а природа не терпит пренебрежительного отношения к себе и зачастую мстит людям, иницируя тем самым стремление людей лучше и глубже понять ее законы.

В табл. 10.4 приведено количество судов, погибших из-за штормов и других неблагоприятных гидрометеорологических условий, главным образом, связанных с сильным волнением, за период с 1975 по 1979 г. Эта выборка относится только к торговым судам относительно большого размера (более 500 регистровых тонн). Количество аварий на более мелких судах за этот же период определяется четырехзначным числом. Стало ясно, что

Таблица 10.3

Ветер, м/с	Высота волн, м	Баллы	Характеристика
	0	0	штиль
	0–0,25	1	слабое волнение
	0,25–0,75	2	умеренное волнение
6	0,75–1,25	3	умеренное волнение
	1,25–2,00	4	умеренное волнение
9	2,00–3,50	5	сильное волнение
11	3,50 6,00	6	сильное волнение
14	6,00–8,50	7	очень сильное волнение
17	8,50 11,00	8	очень сильное волнение
20	> 11	9	исключительно сильное волнение

нужны более точные методы расчета прочности, остойчивости и других мореходных качеств судов. И здесь при конструировании судов инженеры столкнулись с несовершенством наших знаний о волнении. Таким образом, запросы практики совпали с необходимостью дальнейшего развития теории морских волн.

Таблица 10.4

Год	1975	1976	1977	1978	1979
Число погибших кораблей	31	36	37	42	53

В 40–50-е гг. XX столетия бурное развитие получили методы теории случайных функций и математической статистики. Волнение, основной закон которого по лорду Томсону — кажущееся отсутствие какого-либо закона, стали изучать как случайное явление, подчиняющееся определенным законам гидромеханики. На этом пути достигнуты значительные результаты, имеющие и чисто фундаментальное, и прикладное значение. Помимо статистического подхода к изучению морского волнения продолжали развиваться и теоретические методы описания волновых движений в Мировом океане.

Для измерения волн обычно используются акселерометрические буйковые волнографы, основанные на принципе акустического эхолота, и волнографы гидростатического типа. Волнографы обычно измеряют среднюю и максимальную высоту волн, средний период и длину волны, частотный спектр волнения.

В акселерометрическом волнографе элементы волнения определяются путем двойного интегрирования сигнала, получаемого от акселерометрического датчика. Наиболее распространенные зарубежные волнографы устроены именно по такому принципу. Принцип действия гидростатических волнографов основан на связи гидростатических колебаний на некоторой глубине с характеристиками колебаний волновой поверхности.

Эхолотация используется при зондировании мгновенных значений высоты возвышения водной поверхности со свободноплавающего или заякоренного буй (прямой эхолот). Волнографы, принцип действия которых основан на обратной эхолотации, осуществляют зондирование границы раздела вода–воздух из-под воды.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой, альтиметры, установленные на спутниках, позволяют измерять основные характеристики ветровых волн. Дистанционные методы позволяют получать характеристики ветровых волн на значительных территориях. На основе таких измерений, создаются современные атласы ветрового волнения. Представления о волновых данных можно получить на сервере <http://www.waveclimate.com>.

Как показала история развития наших фундаментальных знаний о волнении, необходима тесная связь теоретических, экспериментальных и натурных исследований.

Ветер является существеннейшим параметром, от которого зависят геометрические характеристики волнения. Однако при устойчивом и довольно продолжительном ветре средние характеристики волн увеличиваются по пути их распространения, пока они падают под действием ветра. Этот путь называется длиной разгона ветра, или просто разгоном. Трудности наблюдений морских волн и их регистрации в естественных условиях заставили ученых обратиться к лабораторному моделированию ветрового волнения. На заре изучения морского волнения лабораторное моделирование было почти единственным источником количественных характеристик волн. Однако этот источник оказался весьма ограниченным — и вот почему. Основная трудность при лабораторном моделировании волнения — обеспечить достаточно большой разгон волн, т.е. нужно иметь длинные лотки. Средние параметры волн обычно изменяются во времени и в

пространстве — при усилении ветра увеличиваются, при ослаблении — уменьшаются. При очень большом разгоне и достаточно длительном действии ветра волны достигают максимально возможных для данной скорости ветра размеров. Такое волнение называют полностью развитым. В табл. 10.5 приведены значения высоты волн для полностью развитого волнения в зависимости от скорости ветра.

Таблица 10.5

V , м/с	5	7	10	12	15	17	20	22	25	27	30
h , м	0,4	0,7	1,4	2,0	3,1	4,0	5,6	6,8	8,7	10	12

В прямолинейных лотках создать полностью развитое волнение невозможно. Существенный прогресс в изучении морского волнения методом лабораторного моделирования был сделан академиком В. В. Шулейкиным [156, 157], который предложил очень оригинальное решение этой задачи. Им был создан кольцевой бассейн (шторм-бассейн), на крыше которого были расположены несколько мощных вентиляторов, создающих ветровой поток. Поскольку канал был кольцевой, разгон волн мог обеспечиваться сколь угодно большим, и волны могли при различных скоростных режимах ветра достигать своих максимально возможных размеров. После отключения вентиляторов созданные в бассейне волны переходили в режим зыби и можно было исследовать процесс их затухания. В шторм-бассейне Шулейкин исследовал уравнение баланса волновой энергии, которое применительно к условиям экспериментов имело вид

$$\frac{dE}{dt} = W_a - W_\mu - W_{\text{ст}}. \quad (10.1)$$

Здесь W_a — энергия, передаваемая волне ветром посредством силы нормального давления, W_μ — энергия волнового движения, переходящая в другие виды энергии (диссипативные потери), $W_{\text{ст}}$ — энергия, теряемая волной за счет трения о дно и стенки бассейна, $\frac{dE}{dt}$ — полное изменение энергии волны во времени.

Для очень больших скоростей ветра в реальных условиях полностью развитое волнение в океанах и морях практически не реализуется, так как очень сильные ветры обычно не охватывают одновременно столь большие пространства, на которых волнение может полностью развиться, или для этого не хватает продолжительности действия ветра.

Изучение волновых движений океана имеет фундаментальный характер: его результаты важны для оптики, акустики, пересформирования берегов, перемещения наносов, заносимости морских каналов и для процессов на шельфе.

Воздушный поток над водной поверхностью

Ветер, дующий над водной поверхностью, является источником энергии для ветровых волн. Ветровые волны, возникшие на первоначально неподвижной водной поверхности, сами оказывают значительное влияние на ветровой поток, который вследствие больших градиентов скорости в пограничном слое, является турбулентным. В пределах пограничного слоя характер движения определяется силой трения на подстилающей поверхности [73]. Поток импульса τ_0 в пределах приводного пограничного слоя сохраняет свою величину и выражается следующим образом:

$$\frac{\tau_0}{\rho_a} = u'w' = U_x^2 = C_z V_z^2, \quad (10.2)$$

где ρ_a — плотность воздуха; u' и w' — горизонтальная и вертикальная составляющие пульсаций скорости ветра; U_x — динамическая скорость, или скорость трения; C_z — коэффициент сопротивления; V_z — средняя скорость на высоте z .

В практике обычно используется коэффициент C_{10} , соответствующий высоте 10 м над невозмущенной водной поверхностью. Для воздушного потока над шероховатой водной поверхностью профиль скорости ветра имеет вид

$$V(z) = \frac{U_x}{\vartheta} \ln \frac{z}{z_0}, \quad (10.3)$$

где z_0 — параметр шероховатости, ϑ — постоянная Кармана.

На рис. 10.3 показаны профили скорости ветра, измеренные в натурных условиях.

Коэффициент сопротивления и параметр шероховатости зависят от разгона (протяженность водного пространства, на котором ветер воздействует на водную поверхность), продолжительности действия ветра и его скорости, стратификации воздушного потока. Отмечено, что коэффициент сопротивления растет более интенсивно в стадии зарождающегося волнения, чем в последующей стадии развивающегося волнения.

Существуют многочисленные эмпирические соотношения, определяющие зависимость коэффициента сопротивления от скорости ветра и условий стратификации приводного слоя. Приведем одну из этих зависимостей, полученную в ГГИ, для

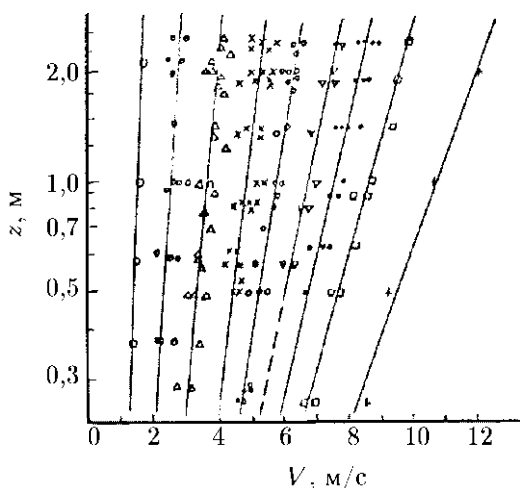


Рис. 10.3. Профили средней скорости ветра по измерениям на озере Веслуг

нейтральных условий стратификации воздушного потока и небольших разгонов:

$$C_{10} = (1,15 + 0,05 V_{10}) \cdot 10^{-3}. \quad (10.4)$$

При обтекании аэродинамически шероховатой поверхности зависимость z_0 от скорости трения U_x определяется формулой Чарпока:

$$z_0 \sim \frac{U_x^2}{g}, \quad (10.5)$$

где g — ускорение свободного падения. Измерения в лабораторных и натурных условиях подтверждают существование данной зависимости. Например, измерения, проведенные на озере Веслуг в условиях ограниченных разгонов, дали следующее выражение для параметра шероховатости:

$$z_0 = \frac{BU_x^{2,3}}{g},$$

где B — константа.

Непрерывность напряжения трения на границе раздела воздух–вода приводит к развитию сдвигового течения в приповерхностном слое воды. Максимальное значение скорости течения в приповерхностном слое воды составляет около 3% от

средней скорости ветра V_{10} . Скорость течения в приповерхностном слое характеризуется сильной пространственно-временной изменчивостью. Это, в частности, связано с изменением соотношения между волновой и чисто дрейфовой составляющей приповерхностной скорости.

Статистическая и спектральная структура ветрового волнения

Как уже говорилось, важнейшей чертой ветровых волн является их случайный характер, поэтому для описания ветровых волн широко используются спектральные и статистические методы. Методы расчетов статистических и спектральных характеристик ветрового волнения подробно рассмотрены в монографии [39]. В условиях больших глубин, где взаимодействие между спектральными составляющими ветрового волнения невелико, плотность распределения ординаты взволнованной поверхности ζ может быть с достаточной точностью описана кривой Гаусса:

$$p_0(\zeta) = (2\pi\sigma)^{-1/2} \exp \left[-\frac{(\zeta - \bar{\zeta})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (10.6)$$

где $\bar{\zeta}$ — среднее значение ζ , σ — среднеквадратичное отклонение.

В мелководной зоне наблюдается значительная трансформация волнового профиля, гребни волн становятся острее, впадины — более плоскими, в этом случае наблюдаются отклонения от распределения Гаусса. Распределение ординат взволнованной поверхности лучше в этом случае описывается функцией Грамма Шарлье:

$$p(\zeta) = p_0(\zeta) \left[1 + \frac{\gamma_1}{3!} H_3 \left(\frac{(\zeta - \bar{\zeta})}{\sigma} \right) + \frac{\gamma_2}{4!} H_4 \left(\frac{(\zeta - \bar{\zeta})}{\sigma} \right) + \dots \right],$$

где $p_0(\zeta)$ определяется формулой (10.6); $\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$ — коэффициент асимметрии; $\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$ — коэффициент эксцесса; $H_3(x) = x^3 - 3x$;

$$H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3.$$

Эмпирические функции распределения смещения волновой поверхности, полученные по измерениям в мелководной зоне Рыбинского водохранилища, лучше согласуются с распределением Грамма-Шарлье, чем с распределением Гаусса [61]. Для анализа функций распределения было использовано 13 записей развитого

ветрового волнения, с каждой записи было снято более 1500 ординат. Значения χ^2 для нормального распределения при числе степеней выборки, равном 9, оказалось 86, в то время как для распределения Грамма–Шарлье около 19.

В случае нормального распределения ординат и узкого энергетического спектра распределение амплитуды волны a подчиняется закону Рэлея:

$$p(a) = \frac{a}{2} \exp\left[-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (10.7)$$

Если считать, что высота волны H равна удвоенному значению амплитуды, то можно получить для плотности распределения высот волн следующее выражение:

$$p(H) = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right]. \quad (10.8)$$

Так как $\bar{H} = (2\pi)^{1/2}\sigma$, то для плотности распределения высот волн можно получить следующее выражение:

$$p(H) = \frac{H}{4\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{8} \left(\frac{H}{\sigma}\right)^2\right]. \quad (10.9)$$

Следует иметь в виду, что распределение Рэлея применимо к описанию распределения высот ветровых волн только в том случае, если $H = 2a$. Это соотношение не выполняется, прежде всего, в прибрежной зоне, т.е. там, где колебания водной поверхности относительно невозмущенного уровня заведомо несимметричны относительно невозмущенного уровня. Для описания распределения высот волн в условиях мелководья иногда используют распределение Вейбулла, которое при определенных условиях переходит в распределения Рэлея.

Второй важнейшей характеристикой ветрового волнения является период ветровых волн. Период волнения определяется как интервал между последовательными пересечениями волновой поверхностью среднего невозмущенного уровня, при этом переход через средний уровень совершается в одинаковой фазе.

В случае, если распределение ординат взволнованной поверхности описывается кривой Гаусса, средний период волны равен

$$T = 2 \left[\frac{m_0}{m_2} \right]^{1/2},$$

где n -й момент частотного спектра волнения $S(\omega)$ имеет вид

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega, \quad n = 0, 1, \dots$$

Существуют многочисленные модели спектров ветровых волн. Общей чертой практически всех моделей является использование гипотезы О. М. Филиппса об интервале равновесия. Согласно гипотезе Филиппса в области частот спектра выше, чем частота его максимума ω_0 , существует интервал равновесия, в котором форма спектра имеет следующий вид:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5}, \quad \omega > \omega_0, \quad (10.10)$$

где α — безразмерная постоянная, зависящая, в общем случае, от безразмерного разгона.

Спектр реального ветрового волнения часто характеризуется наличием не одного, а двух пиков. Возникновение двух пиков в спектре волн может быть обусловлено действием различных механизмов развития ветрового волнения или его сложной структурой — например, сложением двух или нескольких волновых систем. Приведем некоторые результаты исследования ветрового волнения на Рыбинском водохранилище в условиях постоянного ветра, дующего с берега [61]. Регистрация возвышенной поверхности проводилась в 9 точках с разгонами от 17 до 320 м. На рис. 10.4 показаны спектры волн, измеренные при нескольких разгонах. На всех спектрах хорошо выражены два максимума. При динамической скорости $U_x = 23$ см/с фазовая скорость спектральных составляющих низкочастотного максимума равна 3,3 м/с. Средняя скорость ветра на высоте 10 м над водной поверхностью равна 3,6 м/с. При динамической скорости ветра 11 см/с фазовая скорость составляющих низкочастотного максимума была около 2 м/с, скорость ветра на высоте 10 м равнялась 1,7 м/с. Таким образом, фазовая скорость спектральных составляющих низкочастотного максимума с учетом ошибки измерений оказалась равной средней скорости ветра на высоте 10 м.

При увеличении разгона частота низкочастотного максимума не изменяется, а величины спектральных составляющих линейно растут, т.е. развитие низкочастотных спектральных составляющих происходит в соответствии с резонансным механизмом Филиппса. Высокочастотный максимум при увеличении разгона смещается в область низких частот. Рост спектральных составляющих в этой части спектра происходит в соответствии с механизмом неустойчивости Майлса по экспоненциальному закону.

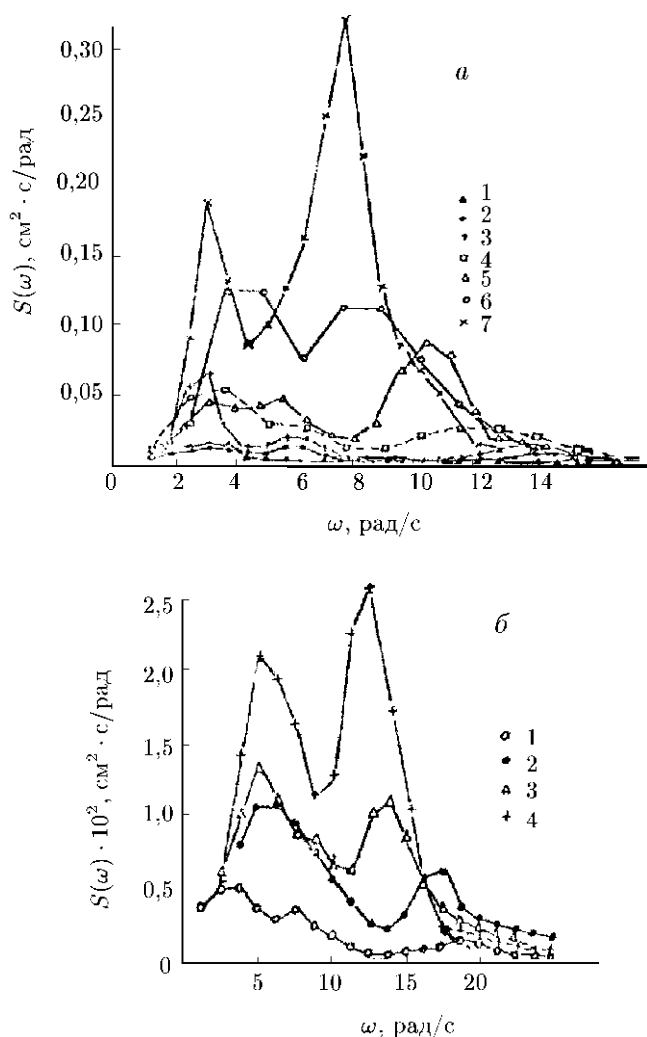


Рис. 10.4. Спектры развивающегося ветрового волнения при постоянной скорости ветра, дующего с берега: *а* $U_x = 23$ см/с, разгон равен 17, 35, 50, 100, 150, 200, 320 м (кривые 1–7); *б* — $U_x = 11$ см/с, разгон равен 50, 100, 150, 200 м (кривые 1–4)

В дальнейшем происходит слияние обоих максимумов. Оценки показывают, что на начальной стадии развития волн действием диссипации и нелинейными механизмами можно пренебречь. С учетом условия стационарности спектральная форма уравнения

баланса волновой энергии может быть записана в следующей форме:

$$C_g \frac{\partial S(\omega)}{\partial x} = \varepsilon + \gamma S(\omega), \quad (10.11)$$

где C_g — групповая скорость, ε — член функции источника, описывающий поступление энергии к волнам под действием механизма Филиппса, $\gamma S(\omega)$ — член функции источника, описывающий поступление энергии к волнам под действие механизма Майлса.

Для низкочастотного максимума спектра рост спектральных составляющих с разгоном X происходит по линейному закону:

$$S(\omega) = \frac{\varepsilon X}{C_g}.$$

Второй член в правой части (10.11) обуславливает экспоненциальный рост спектральных составляющих.

Развитие ветрового волнения можно представить следующим образом. На первоначально неподвижной поверхности воды волны возникают под действием резонансного механизма Филиппса, который описывает генерацию поверхностных волн за счет резонанса между турбулентными пульсациями давления в воздушном потоке и волнами. Реакция водной поверхности максимальна для частотных составляющих волнения, фазовая скорость которых совпадает со средней скоростью ветра. Вследствие турбулентного характера пульсаций давления резонансное взаимодействие происходит не непрерывно, а носит случайный характер. Спектральные составляющие волнового спектра растут пропорционально времени. Затем начинается переход к экспоненциальному росту, обусловленному действием механизма гидродинамической неустойчивости Майлса. В случае действия механизма Майлса волны индуцируют в воздушном потоке пульсации давления. Энергия среднего движения воздушного потока передается к индуцированным волной возмущениям, которые уже передают энергию волнам посредством давления, синфазного наклону волновой поверхности. В модели Майлса профиль скорости ветра играет важнейшую роль в формировании потока энергии и импульса от ветра к волнам.

В отдельных случаях происходит развитие двух волновых систем, соответствующих действию двух механизмов генерации волн. Развитие составляющих спектра на частотах выше частоты максимума происходит с превышением равновесного значения,

при этом каждая спектральная составляющая достигает максимума, затем уменьшается до минимума, и, наконец, выходит на равновесное значение. Этот эффект называется эффектом превышения. Он был выявлен по измерениям в натурных и лабораторных условиях. Передний участок спектра формируется вследствие экспоненциального развития его составляющих и механизма нелинейного перераспределения энергии между спектральными составляющими. Уравнение баланса ветровой энергии подробно рассмотрено в монографиях [39, 69].

Приливы

Наиболее известным и изученным видом длинных волн являются приливы. Приливы вызываются гравитационными (приливообразующими) силами Луны и Солнца. В океанах и морях приливы проявляются в виде периодических колебаний уровня водной поверхности и течений. Приливные движения существуют и в атмосфере, а приливные деформации в твердой Земле, однако здесь они проявляются менее выражено, чем в океане.

В прибрежных зонах величина колебаний уровня достигает 5–10 м. Максимальные значения колебаний уровня достигаются в заливе Фанди (Канада) — 18 м. У берегов России самый высокий прилив наблюдается в Пенжинской губе — 12,9 м. Скорость приливных течений в прибрежной зоне достигает 15 км/час. В открытом океане колебания уровня и скорости течений много меньше.

Приливообразующая сила Луны примерно в два раза больше приливообразующей силы Солнца. Вертикальные составляющие приливообразующей силы много меньше силы тяжести, поэтому их эффект ничтожен. Но горизонтальная составляющая приливообразующей силы вызывает значительные перемещения частиц воды, которые и проявляются в форме приливов.

Совместное действие Луны и Солнца приводит к формированию сложных форм колебаний уровня. Выделяют следующие основные виды приливов: полусуточный, суточный, смешанный, апомальный. В полусуточном приливе период колебаний водной поверхности равен половине лунных суток. Амплитуда полусуточного прилива изменяется в соответствии с фазами Луны. Полусуточный прилив наиболее распространен в Мировом океане. Период колебаний уровня в суточном приливе равен лунным суткам. Амплитуда суточного прилива зависит от склонения Луны. Смешанные приливы подразделяются на неправильные полусуточные и неправильные суточные. Аномальные приливы

имеют несколько разновидностей, но все они достаточно редки в Мировом океане.

Для морской практики большое значение имеет прогноз (или предвычисление) приливных уровней. Предвычисление приливов основано на гармоническом анализе данных наблюдений за колебаниями уровня. Выделив по данным наблюдений основные гармонические составляющие, производят расчет уровня в будущем. Наиболее полное гармоническое разложение приливообразующего потенциала, выполненное А. Дудсоном, содержит более 750 составляющих. Методы предвычисления приливов подробно рассмотрены в [45].

Первая теория приливов была разработана И. Ньютоном и называется статической. В статической теории океан считается покрывающим всю Землю, которая рассматривается как недеформируемая, вода считается невязкой и безынерционной. При океане, покрывающем всю Землю, статический прилив с точностью до постоянного множителя описывается приливным потенциалом. Водная поверхность океана описывается так называемым «приливным эллипсоидом», большая ось которого направлена на возмущающее светило (Луна, Солнце) и следует за ним. Земля же вращается вокруг своей оси и внутри этого «приливно-го эллипсоида». Статическая теория, несмотря на слабость основных допущений, правильно описывает основные свойства приливов.

Более совершенная динамическая теория приливов, в которой уже рассматривается движение волн в океане, была построена Лапласом. В динамической теории уравнения движения и уравнение неразрывности записываются в форме приливных уравнений Лапласа. Приливные уравнения Лапласа являются уравнениями в частных производных, записанными в сферической системе координат, поэтому их аналитическое решение может быть получено только для идеальных случаев, например узкий глубокий канал, опоясывающий всю Землю (так называемая капаловая теория приливов). Для небольших акваторий приливные уравнения Лапласа могут быть записаны в декартовой системе координат. Результаты расчетов приливов в Мировом океане представляются в форме специальных карт, на которых наносится положение гребня приливной волны в различные моменты времени (обычно лунного). Современные карты приливов строят на основе численных методов с учетом данных наблюдений [81].

Цунами

Теория длинных волн исходит из предположения, что глубина жидкости H мала по сравнению с длиной волны λ , т. е. $\lambda \gg H$. В рамках теории длинных волн описываются приливные явления, волны цунами, а также ветровые волны и зыбь, распространяющиеся на мелководье. К длинным волнам относятся также волны паводка и бор, наблюдающиеся на водохранилищах и реках.

Если амплитуда длинных волн a много меньше их длины λ ($a \ll \lambda$), то можно проводить описание, используя линейную теорию. Если же эти условия не выполняются, то необходимо учитывать нелинейные эффекты [99].

Цунами в дословном переводе с японского — «большая волна в гавани». Под цунами принято понимать гравитационные волны, возникающие в море вследствие крупномасштабных, непродолжительных возмущений (подводные землетрясения, извержение подводных вулканов, подводные оползни, падение в воду метеоритов, обломков скал, взрывы в воде, резкое изменение метеорологических условий и т. п.).

Характерная временная длительность волны цунами составляет 10–100 мин; длина — 10–1000 км; скорость распространения (которую можно получить на основе длинноволнового приближения $C = \sqrt{gH}$, где g — ускорение силы тяжести, H — глубина океана) — 10–200 м/с, а высота при накате на берег может достигать десятков метров. Эти волны очень длинные, в первом приближении к ним применима теория «мелкой воды».

По числу погибших в год в результате стихийных бедствий на Земле цунами занимает 5-е место после наводнений, тайфунов, землетрясений, засухи. Распределение цунами по регионам характеризуется сильной неоднородностью, основное количество цунами происходит в морях Тихого океана.

Распределение цунами в океанах и морях характеризуется следующим образом:

Тихий океан (его периферия)	75%
Атлантический океан	9%
Индийский океан	3%
Средиземное море	12%
остальные моря	1%

Для того чтобы получить представление о цунами, приведем характеристики крупнейших цунами за столетний интервал (1880–1980) в табл. 10.6.

Таблица 10.6. Список крупнейших цунами за период 1880–1980 гг.

Дата	Район	Причина цунами	Высота, м	Число жертв
27.08.1883	Индонезия	извержение вулкана	45	36000
15.06.1896	Япония	землетрясение	30	30000
20.02.1902	Гватемала	землетрясение	10	200
31.01.1900	Эквадор	землетрясение	5	1000
10.11.1922	Чили	землетрясение	9	200
2.03.1933	Япония	землетрясение	28	3000
10.07.1958	Аляска	обвал	525	2
22.05.1960	Чили	землетрясение	25	1300
28.03.1964	Аляска	землетрясение	30	122
17.08.1976	Филиппины	землетрясение	9	8000
16.10.1979	Франция	оползень	3	6
12.12.1976	Колумбия	землетрясение	5	259

Для классификации цунами академик С. Л. Соловьев предложил полуколичественную шкалу (на основе анализа исторических цунами), в основе которой лежит высота подъема уровня.

Катастрофические цунами (интенсивность 4). Средний подъем уровня на участке берега длиной 400 км (и более) достигает 8 м. Волны местами имеют высоту 20–30 м. Происходит разрушение всех сооружений на берегу. Такие цунами происходят по всему побережью Тихого океана.

Очень сильные цунами (интенсивность 3). На берегу протяженностью 200–400 км вода поднимается на 4–8 м, местами до 11 м. Такие цунами наблюдаются на большей части Мирового океана.

Сильные цунами (интенсивность 2). На берегу длиной 80–200 км средний подъем уровня воды составляет 2–4 м, местами 3–6 м.

Умеренные цунами (интенсивность 1). На участке 70–80 км вода поднимается на 1–2 м.

Слабые цунами (интенсивность 0). Подъем уровня меньше 1 м.

Прочие цунами имеют интенсивность от -1 до -5 .

Чем сильнее цунами, тем реже они происходят. Цунами интенсивностью 4 происходит 1 раз в 10 лет, причем в Тихом океане; интенсивностью 3 — один раз в 3 года; интенсивностью 2 — 1 раз в 2 года; интенсивностью 1 — 1 раз в год; интенсивностью 0 — 4 раза в год.

Основные причины цунами: землетрясения, взрывы вулканических островов и извержение подводных вулканов, обвалы и оползни. Рассмотрим кратко указанные причины в отдельности.

Около 85% цунами вызывается подводными землетрясениями. Это обусловлено сейсмичностью многих океанических районов. В среднем ежегодно происходит 100 000 землетрясений, из них 100 имеют катастрофический характер. В среднем 1 раз в 10 лет землетрясение вызывает в Тихом океане цунами высотой (средней) до 8 м (в отдельных пунктах до 20–30 м) (интенсивность 4). Цунами высотой 4–8 м (сейсмического происхождения) возникает раз в 3 года, высотой 2–4 м — ежегодно.

На Дальнем Востоке (РФ) за 10 лет происходит 3–4 цунами высотой более 2 м. Самое трагическое цунами в России произошло 4 ноября 1952 г. в Северо-Курильске. Город был практически полностью разрушен. Ночью началось землетрясение, примерно через 40 минут после его окончания на город обрушился водяной вал, который отступил через несколько минут. Морское дно обнажилось на несколько сот метров, но примерно через 20 минут на город обрушилась волна высотой более 10 м, которая уничтожила практически все на своем пути. После отражения от сопков, окружающих город, волна скатилась в низину, где ранее был центр города, и завершила разрушение. Цунами застали жителей города врасплох.

На Земле выделяются две зоны очагов землетрясений. Одна расположена в меридиональном направлении и проходит вдоль восточного и западного берегов Тихого океана. Эта зона дает основную массу цунами (до 80%). Вторая зона очагов землетрясений занимает пиротное положение — Апеннины, Альпы, Карпаты, Кавказ, Тянь-Шань. В пределах этой зоны цунами происходят на берегах Средиземного, Адриатического, Аравийского, Черного морей, в северной части Индийского океана. В пределах этой зоны происходит менее 20% всех цунами.

Механизм генерации цунами при землетрясениях следующий. Основная причина — быстрое изменение рельефа морского дна

(подвижка), вызывающее отклонения поверхности океана от равновесного положения. В виду малой сжимаемости воды происходит быстрое опускание или подъем значительной массы воды в области подвижки. Образовавшиеся возмущения распространяются в виде длинных гравитационных волн.

Для количественного описания землетрясений используются интенсивность и магнитуда. Интенсивность оценивается в баллах (12-балльная шкала MSK-64). (В Японии действует 7-балльная шкала). Балл — единица измерения сотрясения грунта, почвы. Главная характеристика, определяющая балльность, — реакция грунтов на сейсмические волны. Энергия землетрясения определяется магнитудой M .

Важнейшая задача в прогнозе цунами сейсмического происхождения — установление признаков цунамигенности землетрясений. Сейчас считают, что если магнитуда землетрясения превышает некоторое пороговое значение $M_{\text{п}}$, очаг расположен под дном моря, то землетрясение будет цунамигенным.

Для Японии предложены эмпирические формулы, связывающие магнитуду цунамигенных землетрясений и глубину очага H (в километрах):

$$M = 5,6 + 0,01 H.$$

В энергию цунами преобразуется не более 0,1 энергии, выделившейся при землетрясении.

В результате анализа натурных данных установлены следующие свойства очага цунамигенных землетрясений. Энергия распространяется, в основном, по нормали к главной оси очага. Степень направленности зависит от вытянутости очага. Очаги крупных цунами, как правило, сильно вытянуты. Их оси ориентированы параллельно ближайшему берегу, впадине или островной дуге, поэтому основной источник энергии направлен в сторону моря. Отношение амплитуды волны вдоль разлома и амплитуды волны в направлении, перпендикулярном разлому, приблизительно равно 1/10–1/15. Отдельные измерения подтверждают это, например, цунами, вызванное Аляскинским землетрясением 1964 г., волны от которого были зарегистрированы на нескольких сейсмических станциях Тихого океана. Это позволило построить достаточно подробную диаграмму направленности цунами.

Подводные землетрясения вызывают не только волны цунами, они способны вызывать сильные возмущения водного слоя в эпицентральной области, что может проявляться в виде резкого увеличения вертикального обмена в океане [93]. Вертикальный

обмен приводит к трансформации полей температуры, солености и цветности океана. Выход глубинных вод на поверхность приведет к образованию обширной аномалии температуры поверхности океана. Вынос биогенов в обычно обедненный этими веществами поверхностный слой приводит к увеличению концентрации фитопланктона. Так как фитопланктон является первичным звеном в трофической цепи и определяет биопродуктивность вод, возможны явления типа миграции рыбы, морских животных и т. п. Непосредственно над эпицентральной областью наблюдаются сильные возмущения водного слоя, проявляющиеся в бурлении воды, выбросах водяных столбов, формировании крутых стоячих волн амплитудой до 10 м. Среди моряков это явление известно как моретрясение. В результате анализа спутниковых данных температуры поверхности океана и сейсмических данных было выявлено понижение температуры поверхности океана и увеличение концентрации хлорофилла «а», которые последовали за серией сильных подводных землетрясений в районе острова Сулавеси (Индонезия, 2000). Серия лабораторных экспериментов позволила установить, что колебания дна бассейна могут приводить к генерации вертикальных потоков, способных разрушить имеющуюся устойчивую стратификацию и привести к выходу холодных и насыщенных биогенами глубинных вод на поверхность, что приведет к образованию аномалии температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла.

На земле около 520 действующих вулканов, две трети которых находится на берегах и островах Тихого океана. Их извержения часто приводят к возникновению цунами. Приведем некоторые примеры.

При взрыве вулкана Кракатау 26 августа 1883 г. в Индонезии высота волны цунами достигла 45 м, погибло 36000 человек. Волны цунами обегали весь мир. Энергия этой катастрофы эквивалентна энергии взрыва 250–500 тыс. атомных бомб типа хироксимской.

Взрыв вулканического острова Тир в Эгейском море 35 веков назад (вулкан и остров называли раньше Санторин) явился причиной гибели Мinoйской цивилизации. Это событие, вероятно, послужило прообразом Атлантиды. Сотрудники Союзморшипоекта С. Стрекалов и Б. Дугинов так описывают гибель Мinoйской цивилизации.

«Великая Мinoйская цивилизация отличалась непревзойденными произведениями искусства и художественного ремесла, величественными дворцами. В середине XV в. до н.э. на Крит обрушилась катастрофа. Почти все дворцы были разрушены,

поселения покинули их обитатели. Существуют две гипотезы гибели. Согласно одной ее разрушили варвары — греки-ахейцы, согласно другой, причиной стал природный катаклизм. Примерно 3,5 тыс. лет назад в Эгейском море произошел взрыв вулканического острова Санторин. В результате катастрофы образовались гигантские волны, которые обрушились на остров Крит и распространились до Египта, затопив дельту Нила. Так ли это было? Могла ли она стать действительной причиной гибели цивилизации? Эти вопросы определили постановку нижеследующей гидродинамической задачи: «Катастрофическое цунами на побережье Крита и в Египте XV—XIV вв. до н. э.»

В прибрежной зоне Крита под водой на глубинах от 8 до 30 м обнаружены керамические изделия, а на глубинах 30–35 м — строительные блоки, относящиеся к античному времени. Исходя из того, что отливная волна равна приливной, первая также имела высоту 30–35 м. В поиске аналогов подобной волны в примерно соответствующем подводном и надводном рельефе местности мы обратились к наиболее мощной природной катастрофе последних столетий — взрыву вулкана Кракатау (в конце XIX в.). Там волна цунами, по имеющимся данным, достигла в очаге высоты 40 м. Исходя из аналога, мы предположили, что в районе острова Санторин на глубине около 300 м произошло землетрясение силой 8,5 балла. Далее, направление оси очага мы приняли совпадающим с направлением изобат в районе острова Санторин и параллельным продольной оси острова Крит. Затем, в результате расчетов, выполненных по оригинальной методике, разработанной в Союзморниипроекте, установили, что в соответствии с исходными данными, должна была возникнуть одиночная волна цунами типа солитона высотой 44 м и длиной около 100 км; при этом длина продольной оси очага равна 220 км, а его ширина — 50 км. Распространение подобной волны дает возможность предположить нижеследующее.

К югу очага волна уменьшается, и у северного побережья Крита ее высота составляет 31 м. С прохождением в заливы острова высота волны возрастает до 50 м, а после ее отражения от обрывистых берегов и материкового склона отдельные заплески могут достигать высоты 60–100 м. В Средиземное море волна проходит через проливы, ослабевая за счет экранирования островами. По выходе из пролива Касос у южного побережья Крита высота волны составляет 9,3 м. После пересечения Средиземного моря и взаимодействия волны с материковым склоном и шельфом в районе дельты Нила ее высота становится равной 4 м. По дельте Нила, имеющей малый уклон поверхности

(порядка $5,5 \cdot 10^{-5}$), волна распространяется на расстояние 73 км вплоть до устьевой части на корепном берегу, т.е. практически вся мористая часть дельты подвергается затоплению. В дельте Нила в течение исторического периода времени в несколько тысяч лет скорость отложения аллювия была практически постоянной и равной 0,9–1,3 мм в год. Исключенне составляет второе тысячелетие до н.э., когда заметных отложений аллювия по не вполне понятным причинам обнаружить не удалось. Можно предположить, что волна цунами, затопившая в этот период времени дельту, смыла и унесла в море весь поверхностный аллювиальный слой.

Катастрофа, произошедшая на острове Санторин, наряду с экологическими, имела, вероятно, и серьезные социальные последствия. Громадные волны, высотой 30–50 м были вполне в состоянии уничтожить существовавшую на Крите Минойскую цивилизацию. Затопление дельты Нила в период конца XVIII–начала XIX династии фараонов имело прежде всего следствием резкое ухудшение экологической обстановки, связанное с исчезновением плодородного слоя почвы, засолением и образованием болот. Социальные последствия из-за кризиса земледелия в дельте, в конечном счете, могли способствовать началу упадка Египетского царства.»

В недавнее время (8.01.1933) вулканический взрыв на острове Харимкатан привел к образованию цунами, при этом волны достигали 9 м (Курильская гряда).

Наиболее впечатляющий пример образования волны цунами при обвале имел место 10 июля 1958 г. Сход лавины с породой объемом 300 млн м³ со склонов горы Фейрузер (Аляска) в бухту Литуя создал цунами высотой 60 м с максимальным заплеском 524 м (заплеск — высота подъема воды относительно невозмущенного уровня при накате волны на берег).

Цунами высотой до 15 м возникли от падения с высоты 200 м обломки скалы (остров Мадейра, 1930). В Норвегии в 1934 г. цунами высотой 37 м возникли от падения скалы массой 3 млн т с высоты 500 м.

Оползни на склоне оксанической впадины (Пуэрто-Рико) в декабре 1951 г. вызвали волну цунами. Оползни, мутьевые потоки часто наблюдаются на материком склоне оксана, при этом роль индикаторов образования и прохождения оползней или мутьевых потоков играют разрывы кабелей, трубопроводов.

6 октября 1979 г. цунами высотой 3 м обрушились на Лазурный Берег в районе Ниццы. Тщательный анализ сейсмической

обстановки, метеоусловий позволил заключить, что причиной цунами явились подводные оползни. Инженерные работы на шельфе могут спровоцировать образование оползней и, как следствие, возникновение цунами [60].

Взрывы в воде атомных и водородных бомб способны вызвать волну типа цунами. Например, на атолле Бикини взрыв «Бейкер» создал волны высотой около 28 м на расстоянии 300 м от эпицентра. Военными рассматривался вопрос об искусственном создании цунами. Но так как при образовании цунами в волновую энергию превращается только небольшая часть энергии взрыва, и направленность волны цунами низка, энергетические затраты на создание искусственного цунами (мощного волнового пакета в определенной части побережья) очень велики.

В развитии цунами обычно выделяют 3 стадии: 1) формирование волн и их распространение вблизи очага; 2) распространение волн в открытом океане большой глубины; 3) трансформация, отражение и разрушение волн на шельфе, набегание их на берег, резонансные явления в бухтах и на шельфе. Исследованность этих стадий существенно различна.

Для решения гидродинамической задачи расчета волн необходимо задать начальные условия поля смещений и скоростей в очаге. Эти данные можно получить прямым измерением цунами в океане или косвенно, путем анализа характеристик процессов, порождающих цунами. Первые регистрации цунами в открытом океане проведены С. Л. Соловьевым и др. в 1980 г. у Южно-Курильских островов. Существует принципиальная возможность определения параметров в очаге на основе решения обратной задачи — на основе немногочисленных проявлений цунами на берегу определить его параметры в очаге. Однако натуральных данных для корректного решения такой обратной задачи, как правило, очень мало.

Для предсказания проявления цунами в прибрежной зоне и решения других инженерных задач нужно знать изменение высоты, периода, направления фронта волны вследствие рефракции. Этой цели служат рефракционные диаграммы, на которых указывают положение гребней волн (фронтов) на разных расстояниях в один и тот же момент времени, или положения гребня одной и той же волны в разные моменты времени. Лучи (ортогональные положению фронтов) проводятся на этой же карте. Считая, что поток энергии между двумя ортогоналами сохраняется, можно оценить изменение высоты волны. Пересечение лучей приводит к неограниченному росту высоты волны. Мощность, переносимая

гармоническими волнами вдоль волновой трубки шириной b , равна

$$\frac{1}{8}C_{g0}b_0h_0^2\rho_w g = \frac{1}{8}C_gbh^2\rho_w g,$$

где ρ_w — плотность воды, g — ускорение силы тяжести, C_{g0} и C_g — групповая скорость волны в начале и конце волновой трубки, b_0 и b — начальная и конечная ширина трубки, h_0 и h — начальная и конечная высота волны.

Рефракционная диаграмма для цунами строится на основе начального положения фронта (в частном случае — два луча и расстояние между ними) плюс карта глубин. На выходе получают пути волновых лучей, коэффициент рефракции, показывающий изменение ширины участка волнового фронта, высоты волны, времена добегания волны.

Для времени добегания строят специальные карты — карты добегания волн цунами. Эти карты являются основными при простейших схемах предупреждения цунами. Карта добегания может быть построена двух видов: от источника цунами до берега, от берега до потенциальных источников цунами. Расчет времени добегания ведется на основе лучевой теории:

$$t = \int_s \frac{ds}{C_g}, \quad (10.12)$$

где s — криволинейный путь, C_g — групповая скорость. Пример расчета волновой картины цунами в рамках лучевой теории при их генерации источником, расположенным на материковом склоне Южного берега Крыма дан на рис. 10.5. Цифры указывают положение фронта волны в различные моменты времени, положение волновых лучей нормально фронту волны.

При выходе цунами на материковый склон, затем шельф происходит их трансформация, отражение и обрушение, а также пабегание (накат) на сухой берег. В зоне уменьшающихся глубин высоты волн растут, принимая иногда устрашающие размеры. Изменения высоты гармонической волны при изменении глубины описывается формулой Эри–Грина:

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1/4}, \quad (10.13)$$

где h_0 , H_0 — начальные высота и глубина; h , H — текущие высота и глубина. Эту формулу легко получить из сохранения волновой энергии и условия неизменности волнового периода на откосе

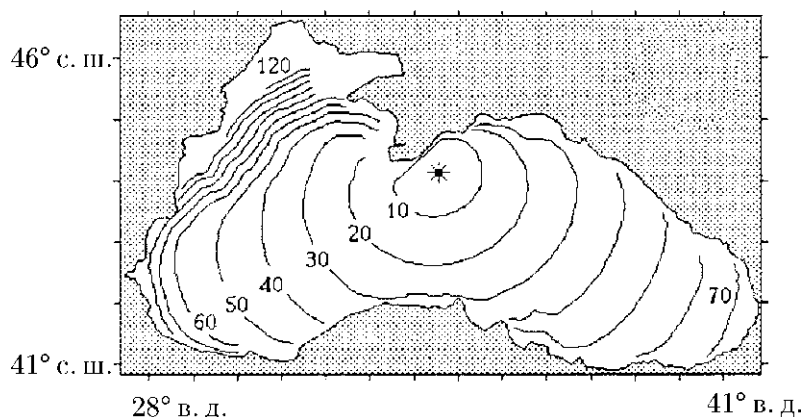


Рис. 10.5. Структура волны цунами в рамках лучевой теории (цифрами указано время распространения волн в минутах) для источника генерации, расположенного на материковом склоне Южного Крыма

переменной глубины. Формула имеет ограниченное применение, так как она не учитывает отражение волн откосом, потери энергии на трение. Формула справедлива только для очень пологого откоса, если на нем укладывается несколько длин волн. Если форма волны отличается от гармонической волны, закон трансформации амплитуды также изменяется. Формула Эри Грина на урезе теряет физический смысл, так как при стремлении глубины к нулю должен наблюдаться бесконечный рост высоты волны! Поэтому на практике эту формулу применяют до некоторой глубины (например, 10 м).

Пройдя урез воды цунами, не обрушившись или обрушившись, продолжают свое движение уже по сухому берегу. Движение воды по сухому берегу называется «накатом» или «заплеском». Для решения многих практических задач необходимо знать средние и максимальные скорости наката при заданных параметрах волн на глубокой воде и определенном рельефе. Наибольший практический интерес имеют данные о границе и уровне затопления при накате на берег. Ясно, что это нелинейная задача, поскольку глубина воды становится соизмеримой с высотой волны. Различают следующие виды наката. Расплескивающийся бурун, который наблюдается при малых наклонах откоса и высотах волн; ныряющий бурун (в этом случае вершина волны обгоняет ее подножие, волна наклоняется вниз) наблюдается при больших наклонах, чем предыдущий тип наката; коллапсирующий волна разрушается вблизи подножия на еще больших наклонах;

вздымающийся бурун — волна накатывается без обрушения на крутых откосах.

Цунамирайонирование и служба предупреждения цунами

Среди мероприятий, направленных на снижение ущерба от волн цунами, важнейшее место занимает составление карт затопления побережья. Районирование по степени цунамиопасности включает в себя широкий комплекс проблем [154]:

- сейсморайонирование океанов и морей (выделение сейсмоактивных зон, определение повторяемости землетрясений и т. д.);
- определение гидродинамических характеристик очагов цунами (поле смещения водной поверхности и скоростей частиц воды);
- расчеты движения волн цунами в океане с реальной батиметрией; оценка проявления интенсивности цунами на берегу.

Для определения района наибольшей цунамиопасности необходимо определить форму наиболее эффективного очага (эффективность в смысле генерации максимально возможной волны) и его наиболее опасное положение для исследуемой части побережья. Далее рассматривается взаимодействие критической (максимальной) волны с берегом.

Кратко рассмотрим схему, по которой проводилось цунамирайонирование Тихоокеанского побережья СССР. Анализ карт-схем очагов цунами и зон сейсмической активности позволил определить границу очагов цунамигенных землетрясений, анализ данных о периодах — определить характерную ширину очага и период генерируемых волн (существуют эмпирические зависимости подобного рода).

Соловьев и Поплавский предложили форму обобщенного очага — полоса, вытянутая вдоль берега на расстоянии 70 км от него, шириной 90 км. Длина волны, генерируемой очагом, равна 90 км, начальное возмущение — 2 м (оно распадается на две волны, высотой по 1 м, бегущие в разные стороны).

Далее проводится расчет движения волн с учетом реальной топографии — на первом этапе расчет можно вести лучевым методом, затем с учетом нелинейности, дисперсии и отражения волн.

На заключительном этапе решается задача наката волн, что позволяет определить наиболее опасные участки берега.

Для выдачи конкретных рекомендаций необходимо оценить вероятность возникновения цунами заданной величины на том или ином участке побережья. Обычно говорят об обеспеченности, которая определяет вероятность того, что волна за тот или иной временной интервал превысит заданную величину. Для анализа натурных данных по накату цунами строятся функции повторяемости высот цунами. На основе функции повторяемости можно оценить максимальный накат, возможный раз в 10, 50, 100 лет и так далее.

Для конкретного пункта максимальный подъем уровня (за период наблюдений T') оценивается по формуле

$$h_T = K(x) (\lg T' + \lg A),$$

где $K(x)$ — коэффициент усиления, определяемый расчетом и зависящий от топографии; T — период наблюдения; $\lg A$ — оценка частоты сильных цунами, которая находится по функции распределения.

Для анализа натурных данных по накату цунами строятся функции повторяемости высот цунами:

$$\frac{n}{t} = A 10^{-H/Q},$$

где A — коэффициент, характеризующий повторяемость сильных цунами; Q — коэффициент, характеризующий степень цунами-опасности, обычно сильно изменяется вдоль побережья; n — число цунами за t лет с высотой, превышающей пороговое значение H . Например для Усть-Камчатска эта формула принимает вид

$$\frac{n}{t} = 0,14 \cdot 10^{-H/1,9}.$$

Для Усть-Камчатска максимальный заплеск, возможный раз в 100 лет, равен $H_{100} = 2,2$ м.

Цунамирайопирование является важнейшей процедурой, которая должна предшествовать проектированию и строительству во многих регионах нашей страны. Рис. 10.6, 10.7 демонстрируют, что российское побережье Черного моря, вопреки широко распространенным представлениям, является цунамиопасным регионом.

Системы предупреждения о цунами (СПЦ) начали появляться в середине XX века. Первой в 1948 г. была создана система в Гонолулу. Затем на ее базе была создана международная

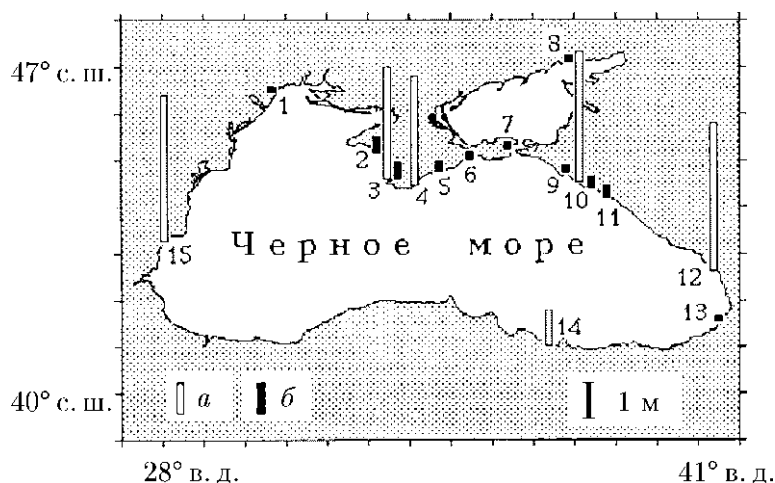


Рис. 10.6. Высоты исторических цунами в Черном море: *a* — по описаниям; *b* — по мареографным данным



Рис. 10.7. Наиболее вероятные зоны сейсмической генерации цунами в Черном море

система предупреждения. Позже начали появляться региональные системы предупреждения о цунами. Первая из них — японская действует с 1952 г. Советская служба предупреждения действует с 1958 г. В 1967 г. был создан Аляскинский центр в г. Пальмере. С 1971 г. и 1977 г. действуют 2 региональных центра на Гавайских островах. С 1985 г. действует система предупреждения во Французской Полинезии. С 1987 г. работает система предупреждения цунами в Чили.

Советская (российская) служба предупреждения на Дальнем Востоке начала создаваться после Постановления СМ СССР от 23.10.1956. Дальний Восток протянулся на 4500 км от мыса Дежнева до Владивостока. Вдоль Курило-Камчатской островной дуги расположены глубоководный желоб, поле действующих вулканов и пояс землетрясений длиной около 1900 км. Сейсмичность этого района — одна из самых высоких в мире, только северо-восток Японии впереди. 80% землетрясений в СССР приходится на Курило-Камчатскую область. Катастрофическое цунами 4 ноября 1952 г. уничтожило г. Северо-Курильск.

Система была введена в строй в 1958–1959 гг. и включала три специализированные цунами-станции в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске, Курильске, пункты гидрометеорологических наблюдений за уровнем, каналы оповещения населения об угрозе цунами. Каждая из цунами-станций в тревожный период действует автоматически только в своем административном районе.

В систему предупреждения входит сейсмическая и гидрофизическая подсистемы. Сейсмическую систему образуют 6 сейсмостанций Академии наук: «Южно-Сахалинск», «Шикотан», «Курильск», «Северо-Курильск», «Петропавловск», «Владивосток». Гидрофизическая подсистема базируется на использовании прибрежных гидрометеостанций: 15 из Камчатского УГКС, 5 из Приморского УГКС, 33 из Сахалинского УГКС.

Основным рабочим методом является сейсмический, основанный на регистрации опережающих цунами сейсмических волн. Заблаговременность прогноза определяется разностью времен прихода сейсмических волн на цунами-станцию и волн цунами к ближайшему участку побережья. Для Курило-Камчатского побережья в неблагоприятных условиях заблаговременность составляет около 15 мин. На обработку отводится не более 10 мин.

Возможность возникновения цунами в результате землетрясения оценивается по магнитудно-географическому критерию. Землетрясение считается цунамигенным, если его эпицентр попадает в цунамигенную зону, а магнитуда превышает некоторое пороговое значение $M_{\text{п}}$. Дежурный сейсмолог обязан передать сообщение об угрозе цунами в каналы оповещения.

Советская СПЦ нацелена прежде всего на прогноз цунами от близких Курило-Камчатских землетрясений и носит характер региональной. Независимо от международной службы ведутся наблюдения за проявлением активности на всей акватории Тихого океана.

Анализ работы службы за 1958–1980 гг. показал следующее. Произошло 70 землетрясений с магнитудой более 7, по которым должны были быть объявлены сигналы тревоги. Тревога была объявлена лишь в 30 случаях (43%). Из 30 тревог оправдались 10 (с высотой цунами более 0,5 м). В 20% случаев служба дала пропуск цунами. Главной причиной пропуска тревог является систематическая погрешность в определении магнитуды на цунами-станциях. Появление ложных тревог обусловлено занижением пороговых значений магнитуд. Радикальное решение проблемы ложных тревог — использование гидрофизического метода прогноза, основанного на прямой регистрации в открытом океане характеристик цунами. Такие работы проводились в Институте морской геологии и геофизики под руководством академика С. Л. Соловьева в рамках Всесоюзной программы создания единой системы предупреждения о цунами. Первые измерения волн цунами в открытом океане проведены в 1980 г. на острове Шикотан.

Существующая система имеет много недостатков:

- отсутствие оперативной связи между сейсмическими станциями (связь позволит вести обработку сигналов с нескольких станций, что уменьшит ошибку в определении локализации очага землетрясения, его магнитуды);
- ручная обработка сигналов;
- малое число использованных сейсмостанций;
- отсутствие технических средств для получения гидрофизической информации на достаточном удалении от берега.

В 1980 г. под руководством академика С. С. Соловьева проводилась интенсивная работа по созданию Единой автоматизированной системы наблюдений за возникновением и распространением цунами и предупреждением о них. Предполагалось, что объединение в одном блоке сейсмической и гидрофизической (обеспечивающей регистрацию цунами в открытом океане) систем, автоматизация обработки сигналов снизит процент ложных тревог и повысит заблаговременность.

События на Средних и Южных Курилах в ночь с 4 на 5 октября 1994 г. показали, что сейчас система предупреждения практически не действует. Стихия застала жителей врасплох.

В заключение расскажем об одном из самых совершенных региональных центров предупреждения о цунами. Аляскинский

центр предупреждения о цунами (АЦПЦ) создан в 1967 г. в Пальмере как региональный центр с целью оповещения о цунами на Аляске и Алеутских островах. В 1982 г. в зону его ответственности было включено западное побережье США и Канады. Так как в зоне Алеутских островов и Аляски очаги подводных землетрясений расположены вблизи берега (время подхода цунами составляет 10–20 мин), была организована телеметрическая система наблюдений и передачи сейсмических и мареографных сигналов в реальном масштабе времени в операционный центр в Пальмере.

Сеть наблюдений АЦПЦ является одной из самых больших и современных в мире геофизических сетей с телеметрией. Она включает 140 сейсмических и 8 приливных станций. Эти станции принадлежат четырем ведомствам, но это не мешает их совместной работе.

В настоящее время система работает в автоматизированном режиме. Определение параметров землетрясения производится в течение 5–7 мин после регистрации землетрясения.

Для землетрясений Алеуто-Аляскинской зоны АЦПЦ объявляет тревогу цунами при магнитуде более 6,75, не ожидая подтверждения цунами от приливных станций, поскольку очаги землетрясений очень близки. Для землетрясений в районах Командорских островов, западного побережья США и Канады с магнитудой больше 7,5 выпускается предупреждение, а тревога подается лишь в случае подтверждения цунами мареографными станциями. Такой дифференцированный подход позволяет уменьшить число ложных тревог.

Отметим некоторые общие черты систем предупреждения цунами (СПЦ). Во всех существующих на Тихом океане СПЦ за основу принят сейсмический метод. Гидрофизический метод не получил широкого распространения. Гидрофизические данные используются в СПЦ для подтверждения возникновения цунами или отмены сигналов тревоги.

Международная система (Гонолулу) ориентирована на наблюдение за крупными тихоокеанскими цунами. Процедуры ее работы предусматривают подтверждение существования цунами от сети мареографных станций. В силу этого Международная СПЦ не обеспечивает своевременно предупреждения для близких очагов цунами.

Региональные СПЦ, основанные на сборе и обработке данных с распределенных сетей, способны обеспечить выпуск предупреждений в пределах 20 мин. Так как времени на подтверждение цунами не остается, такие системы работают

только на основе сейсмической информации. Главная проблема в работе таких систем — высокий процент ложных тревог, отсутствие методов прогноза ожидаемых высот волн.

Для зон, в которых время распространения цунами до ближайшего берега меньше 10 мин, прогноз цунами строится на основе наблюдений и измерений макросейсмического эффекта землетрясений непосредственно в этих зонах. Такие локальные СПЦ начали создавать в последние годы (Япония, Чили, Гавайи).

Общая тенденция развития систем предупреждения — автоматизация системы обработки данных (сейсмических) и развитие телеметрических систем передачи сейсмических и гидрофизических данных.

Теория потенциальных волн

В настоящем разделе познакомимся с теорией потенциальных волн, которая исторически возникла раньше других и является наиболее простой и развитой.

Рассмотрим идеальную, несжимаемую, однородную жидкость. В начальный момент времени эта жидкость покоится, повсюду на эту жидкость действует атмосферное давление P_0 (жидкость находится в состоянии равновесия). Пусть теперь на поверхность жидкости (в нашем случае воды) в течение малого промежутка времени Δt действует добавочное давление P , которое является функцией координат. Это дополнительное давление выведет жидкость из состояния равновесия, т. е. сообщит частицам жидкости начальные скорости. Значения скоростей частиц жидкости можно найти интегрированием уравнений движения. Для случая идеальной несжимаемой однородной жидкости уравнения движения могут быть записаны в виде уравнения Эйлера:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla P, \quad (10.14)$$

где $\mathbf{V} = (u, v, w)$, P — добавочное давление, F — массовые силы. Уравнение Эйлера отражает тот факт, что в идеальной несжимаемой однородной жидкости изменения скорости частицы вследствие изменения времени и ее перемещения в пространстве происходят под действием только массовых сил и сил давления.

Для нахождения скорости движения жидкости, возникшего под действием добавочного давления P , проинтегрируем уравнение Эйлера по времени от 0 до Δt , т. е. за промежуток, в течение

которого действует добавочное давление P :

$$\int_0^{\Delta t} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} dt = - \int_0^{\Delta t} (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} dt + \int_0^{\Delta t} \mathbf{F} dt - \frac{1}{\rho} \int_0^{\Delta t} P dt. \quad (10.15)$$

(1)
(2)
(3)
(4)

(1) единственный член в левой части выражения (10.15) после интегрирования даст выражение

$$\mathbf{V} \Big|_{t=\Delta t} - \mathbf{V} \Big|_{t=0},$$

но так как в начальный момент жидкость покоилась, то $\mathbf{V} \Big|_{t=0} = 0$ и слева останется только величина $\mathbf{V} \Big|_{t=\Delta t} = \mathbf{V}$. Члены (2) и (3) в правой части уравнения (10.15) после интегрирования будут малыми величинами порядка Δt и ими можно пренебречь.

Рассмотрим член (4). Предположим, что добавочное давление P настолько велико, что последний член в правой части уравнения (10.15) конечен, несмотря на малость временного промежутка Δt . Введем обозначение

$$J = \int_0^{\Delta t} P dt,$$

и тогда уравнение (10.15) может быть записано в виде

$$\mathbf{V} = \text{grad } \Phi_1, \quad (10.16)$$

где $\Phi_1 = \frac{J}{\rho}$, причем мы учли, что ρ — величина постоянная и может быть внесена под знак градиента. Таким образом, мы получаем, что скорость $\mathbf{V}$ движения жидкости, возникающего под действием приложенного к ее поверхности импульса давления J , выражается как градиент некоторой функции $\Phi_1 = \Phi_1(x, y, z)$. При этом справедливо соотношение

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{grad } \Phi_1 = \text{grad } \frac{\partial \Phi_1}{\partial t}. \quad (10.17)$$

После окончания действия добавочного давления P движение сохранится и будет происходить под действием силы тяжести (массовых сил). Но сила тяжести есть потенциальная сила и ее можно записать в виде

$$\mathbf{F} = -\text{grad } U, \quad (10.18)$$

где U — потенциал силы тяжести. При положительном направлении оси Z вверх $U = +gz$, и тогда $F = -g$. В силу сказанного сохраняется и безвихревой, т. е. потенциальный характер движения жидкости после окончания действия добавочного давления P . А если это так, то, используя соотношения (10.16), (10.17), (10.18) и соотношение

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla)\mathbf{V} = \frac{1}{2} \text{grad } V^2,$$

уравнение Эйлера в векторной форме можно записать в виде

$$\text{grad} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + \frac{V^2}{2} + U + \frac{P}{\rho} \right) = 0. \quad (10.19)$$

Но это означает, что выражение, стоящее в скобках, не зависит от координат, а есть только функция времени, т. е.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + \frac{V^2}{2} + U + \frac{P}{\rho} = f(t). \quad (10.20)$$

Введем теперь вместо функции Φ_1 функцию Φ_2 , которая будет определяться соотношением

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} = \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} - f(t). \quad (10.21)$$

Так как $f(t)$ есть функция только времени, можно записать, что

$$\mathbf{V} = \text{grad } \Phi_1 = \text{grad } \Phi_2.$$

Тогда соотношение (10.20) может быть переписано в виде

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{P}{\rho} = 0. \quad (10.22)$$

В этом уравнении содержится две неизвестные величины Φ_2 и P . Следовательно, необходимо еще одно уравнение. Используем теперь уравнение неразрывности, которое в случае $\rho = \text{const}$, имеет вид

$$\text{div } \mathbf{V} = 0.$$

С учетом того, что $\mathbf{V} = \text{grad } \Phi_2$, получим

$$\frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial z^2} = 0,$$

или

$$\Delta \Phi_2 = 0. \quad (10.23)$$

Это уравнение Лапласа, из которого можно определить функцию Φ_2 , а затем, зная Φ_2 , из уравнения (10.22) найти и величину добавочного давления P , необходимую для расчета вектора скорости движения жидкости. Но уравнение Лапласа имеет множество решений. Чтобы выбрать из них то, которое соответствует рассматриваемой задаче, необходимо учесть граничные и начальные условия. Поскольку мы рассматриваем водоемы, то граничные условия должны быть заданы на дне водоема и на его свободной поверхности. Вблизи дна жидкость течет параллельно твердой поверхности, и нормальная составляющая скорости на дне равна нулю, т. е.

$$\left. \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right|_{z=-H} = 0. \quad (10.24)$$

Что касается свободной поверхности, то здесь давление воздуха равно атмосферному, т. е. $P = P_0$.

С учетом сказанного преобразуем несколько функцию Φ_2 , введя вместо нее функцию

$$\Phi = \Phi_2 + \frac{P_0}{\rho} t,$$

второе слагаемое в правой части здесь есть функция только времени. Тогда уравнение (10.22) примет вид

$$\frac{P - P_0}{\rho} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right)^2 \right] + gz = 0. \quad (10.25)$$

На свободной поверхности $P = P_0$; z уже не будет равно нулю, а будет описываться величиной ξ , т. е. $z = \xi$, где ξ — возвышение свободной поверхности над ее невозмущенным уровнем. Следовательно, граничное условие при $z = \xi$ будет иметь вид

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \Big|_{z=\xi} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] \Big|_{z=\xi} + g\xi = 0. \quad (10.26)$$

Поскольку в этом уравнении появилась еще одна неизвестная величина ξ , необходимо дополнить систему уравнений еще одним. Таким уравнением будет так называемое кинематическое граничное условие, которое определяет связь между отклонением свободной поверхности $\xi(x, y, z)$ от невозмущенного уровня и вертикальной составляющей скорости частицы $w = \frac{d\xi}{dt}$ на свободной поверхности, т. е. при $z = \xi$. Кинематическое условие

отражает тот факт, что частицы воды, находящиеся на свободной поверхности, остаются на ней во все время движения, и имеет вид

$$\left. \frac{d\xi}{dt} \right|_{z=\xi} = w \Big|_{z=\xi} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \right) \Big|_{z=\xi}. \quad (10.27)$$

Теперь осталось задать начальные условия. В момент времени $t = 0$ задаются отклонения свободной поверхности от положения равновесия

$$\xi \Big|_{t=0} = f_1(x, y) \quad (10.28)$$

и потенциал скорости

$$\Phi \Big|_{t=0} = f_2(x, y). \quad (10.29)$$

Зная потенциал скорости Φ , можно найти и составляющие скорости по осям X, Y, Z в начальный момент времени.

Таким образом, система уравнений, позволяющая описать волновое движение в идеальной несжимаемой однородной жидкости, вместе с граничными и начальными условиями будет иметь следующий вид:

динамическое уравнение

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \right)^2 \right] + gz + \frac{P - P_0}{\rho} = 0; \quad (10.30)$$

уравнение Лапласа

$$\frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial z^2} = 0; \quad (10.31)$$

граничные условия на свободной поверхности ($z = \xi$)

$$\left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] \Big|_{z=\xi} + g\xi = 0, \quad (10.32)$$

$$w \Big|_{z=\xi} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial x} u + \frac{\partial \xi}{\partial y} v \right) \Big|_{z=\xi};$$

граничное условие на дне ($z = -H$)

$$\frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \Big|_{z=-H} = 0; \quad (10.33)$$

начальные условия ($t = 0$)

$$\begin{aligned}\xi \Big|_{t=0} &= f_1(x, y), \\ \Phi \Big|_{t=0} &= f_2(x, y).\end{aligned}\tag{10.34}$$

Динамическое уравнение и граничное условие на свободной поверхности являются нелинейными, и решение этой системы даже при упрощающих предположениях (однородная несжимаемая жидкость без вязких сил) весьма затруднительно.

Существует два основных приближения в теории волн:

- теория волн бесконечно малой амплитуды;
- теория длинных волн.

Теория волн бесконечно малой амплитуды

Теория волн бесконечно малой амплитуды предполагает, что амплитуда волны a существенно меньше ее длины λ ($a \ll \lambda$). Тогда и скорости движения частиц жидкости в волне, определяемые через потенциал скорости, будут также бесконечно малыми величинами, а их квадраты тем более малы и ими можно пренебречь в динамическом уравнении и в граничном условии при $z = \xi$. При этом уравнения становятся линейными. Система уравнений (10.30)–(10.32) трансформируется следующим образом:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz + \frac{P - P_0}{\rho} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}.$$

Ввиду малости отклонений от невозмущенного уровня граничные условия можно рассматривать при $z = 0$, а не при $z = \xi$.

Данная система уравнений допускает решение в виде плоских или двумерных волн, когда движение каждой частицы жидкости происходит параллельно плоскости xOz . Потенциал скорости в случае бесконечно глубокой жидкости будет иметь следующий вид:

$$\Phi = C e^{+kz} \sin(kx - at).$$

Соответствующее возвышение поверхности имеет вид

$$\xi = C \frac{\omega}{g} e^{+kz} \cos(kx - at).$$

Постоянная C определяется начальными условиями.

Теория волн бесконечно малой амплитуды на бесконечно глубокой воде позволила получить очень важное в теории морских волн дисперсионное соотношение:

$$\omega^2 = kg \quad (10.35)$$

(ω — частота волны; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; g — ускорение силы тяжести). Дисперсионное соотношение позволяет определять длину волны λ и фазовую скорость c волн, если известны частота волн ω или их период $T = 2\pi/\omega$:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{2\pi g}{\omega^2}, \quad (10.36)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} = \frac{g}{\omega} = \frac{\omega}{k}.$$

Если глубина жидкости H ограничена и $\frac{H}{\lambda} \ll 1$ (как, например, при распространении приливных волн в морях и океанах), то фазовая скорость волн будет иметь вид

$$c = \sqrt{gH}, \quad (10.37)$$

т. е. зависит только от глубины. Таким образом, дисперсия волн на мелкой воде отсутствует. Зависимости $c(\lambda)$ при постоянной глубине H и $c(H)$ для волн постоянной частоты ω показаны на рис. 10.8.

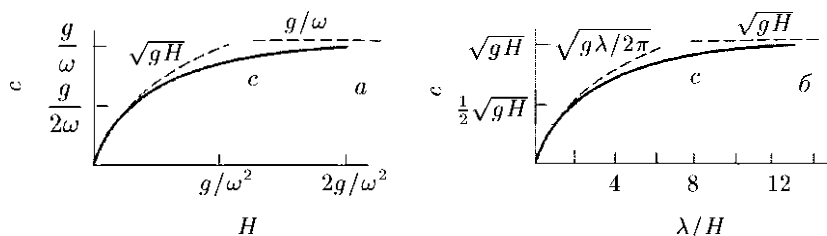


Рис. 10.8. Зависимость фазовой скорости c от длины волны при постоянной глубине (а) и от глубины жидкости для волн постоянной частоты (б)

При уменьшении длины поверхностных волн силы поверхностного натяжения начинают оказывать на них все большее влияние. Для волн длиной несколько миллиметров силы поверхностного натяжения доминируют над гравитационными силами. Интервал длин волн от 0,2 до 20 см, в котором гравитационные и поверхностные силы имеют величины одного порядка, называется гравитационно-капиллярным. Волны с длиной более 20 см относятся к гравитационным; меньше 0,2 см — к капиллярным. Короткие гравитационно-капиллярные и капиллярные волны иногда называют рябью. Фазовая скорость гравитационно-капиллярных волн имеет вид

$$c = \left(\frac{g}{\omega} + \frac{\alpha k^2}{\rho \omega} \right) \operatorname{th} kH, \quad (10.38)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения. Первое слагаемое — чисто гравитационное, оно возрастает при увеличении длины волны. Второе слагаемое — чисто капиллярное — уменьшается с ростом длины волны. Поэтому $c(\lambda)$ имеет минимум, который легко найти из условия

$$\frac{dc}{d\lambda} = 0.$$

Зависимость фазовой скорости гравитационно-капиллярных волн от длины волны представлена на рис. 10.9. Для линейных гравитационно-капиллярных волн их характеристики являются аддитивными функциями гравитационных сил и сил поверхностного натяжения.

Как уже упоминалось ранее, при любой степени волнения на поверхности воды присутствуют волны разных периодов, имеющие различные скорости распространения. При наложении волн друг на друга образуются группы волн, которые распространяются со скоростью, отличной от скорости отдельных волн. Рассмотрим упрощенный случай, когда на поверхности жидкости присутствуют две системы гравитационных синусоидальных волн с одинаковыми амплитудами a , которые распространяются

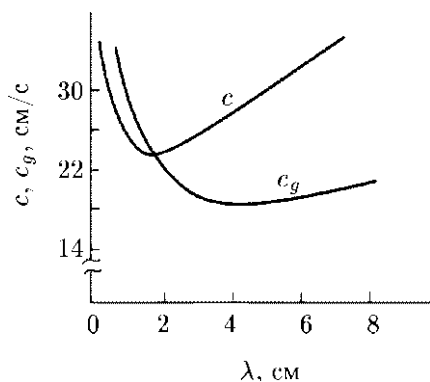


Рис. 10.9. Зависимость фазовой и групповой скоростей гравитационно-капиллярных волн от длины волны

в одном и том же направлении X , но с разными фазовыми скоростями $c_1 = g/\omega_1$ и $c_2 = g/\omega_2$. Пусть эти системы волн имеют близкие частоты и длины. Результирующее колебание свободной водной поверхности в этом случае будет выражаться произведением двух гармонических функций координат и времени:

$$\xi = 2a \cos\left(\frac{k_1 - k_2}{2}x - \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \cos\left(\frac{k_1 + k_2}{2}x - \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right). \quad (10.39)$$

Первый сомножитель можно рассматривать как амплитуду результирующих волн, медленно изменяющуюся от 0 до $2a$, т. е. до удвоенного значения амплитуд складываемых волн. Совокупность волн (с периодом T и длиной λ), амплитуды которых последовательно возрастают от 0 до $2a$, а затем убывают от $2a$ до 0, образуют группу. Максимум группы перемещается со скоростью, называемой групповой. Групповая скорость равна

$$c_g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \approx \frac{d\omega}{dk}. \quad (10.40)$$

Используя соотношение

$$\omega = ck,$$

получим

$$c_g = \frac{d(ck)}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda}. \quad (10.41)$$

Групповая скорость c_g может быть больше, меньше или равна фазовой скорости c . Нормальная дисперсия $\left(\frac{dc}{d\lambda} > 0\right)$ и $c_g < c$ имеет место для гравитационных волн на глубокой воде. В случае бесконечно глубокой жидкости, когда справедливо соотношение $\omega^2 = gk$, имеем

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\sqrt{gk}}{dk} = \frac{c}{2}, \quad (10.42)$$

т. е. фазовая скорость в два раза превышает групповую.

Если глубина жидкости конечна, то

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kH}{\operatorname{sh} 2kH}\right). \quad (10.43)$$

В случае очень малой глубины, когда $kH \ll 1$, групповая скорость становится равной фазовой $\left(\frac{dc}{d\lambda} = 0\right)$ и $c_g = c$. Равенство

фазовой и групповой скоростей имеет место для длинных волн на мелкой воде.

Аномальная дисперсия $\left(\frac{dc}{d\lambda} < 0 \text{ и } c_g > c\right)$ характерна для капиллярных волн. Зависимость групповой скорости гравитационно-капиллярных волн от длины волны приведена на рис. 10.9.

Из теории волн бесконечно малой амплитуды следует экспоненциальное убывание с глубиной скорости движения частиц в волне, круговые траектории движения частиц при волновом движении, экспоненциальное убывание с глубиной радиуса этих окружностей. При этом затухание волн с глубиной происходит избирательно: короткие волны затухают быстрее, чем длинные. Это явление получило название гидродинамической фильтрации.

Глава 11

Акустика океана

Скорость звука в океане

Говоря о многообразии волновых движений в Мировом океане, следует иметь в виду и такой тип волн, как акустические волны, которые могут существовать в морской воде благодаря ее сжимаемости. Наука о подводном звуке, о его излучении, распространении, поглощении, рассеянии, отражении и приеме носит название акустики океана, или гидроакустики. Роль этой науки очень велика, так как из всех открытых до настоящего времени видов энергии звуковая энергия распространяется в воде на наибольшие расстояния [47, 139].

Изобретение и применение эхолота совершило переворот в гидрографии. Были получены батиметрические карты Мирового океана, открыты глубоководные впадины и хребты. Гидросейсмические методы позволили изучить геологическую структуру океанического дна. Гидроакустические методы используются для изучения течений, поверхностных и внутренних волн, морских льдов, структуры водных масс. Гидроакустика широко применяется для решения прикладных задач, таких как промысел рыбы, поиск полезных ископаемых, навигация и др. Огромна роль гидроакустики в подводном плавании. История подводного флота неразрывно связана с развитием гидроакустики. Можно вспомнить о многих драматических и героических страницах войны на море, связанных с акустикой. Это, например, история обезвреживания советскими минерами в 1942 г. фашистских акустических мин, снабженных прибором кратности, история создания первых акустических тралов сотрудниками Физического института АН СССР им. П. Н. Лебедева под руководством академика Н. Н. Андреева, или история разработки акустических мин и методов борьбы с ними в период Великой Отечественной войны. Не менее захватывающие события происходят и в наше время.

Условия распространения акустических волн в океане имеют целый ряд специфических особенностей, обусловленных, с одной стороны, свойствами собственно водной среды океана, а с другой стороны — свойствами граничных сред, т. е. атмосферы и дна.

Звук — продольные упругие волны, и скорость его распространения определяется соотношением

$$C_{\text{зв}} = \sqrt{\frac{\tilde{\chi}}{\rho_w}} = \sqrt{\frac{1}{K_s \rho_w}}, \quad (11.1)$$

где ρ_w — плотность морской воды, $\tilde{\chi}$ — адиабатический модуль объемной упругости, $K_s = \tilde{\chi}^{-1}$ — адиабатический коэффициент сжимаемости морской воды. Величины K_s и плотность ρ_w зависят от температуры t , солености S и давления P . Следовательно, и скорость звука в воде $C_{\text{зв}}$ будет функцией этих характеристик и может быть записана в виде

$$C_{\text{зв}} = C_0 + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{STP}.$$

Это формула Фрая и Пага (1971), в которой $C_0 = 1449,3$ м/с — скорость звука при $T = 0^\circ\text{C}$, $S = 35\text{‰}$ и нормальном атмосферном давлении; ΔC_T , ΔC_S , ΔC_P , ΔC_{STP} — соответственно поправки на изменение температуры, солености, давления и их нелинейное взаимодействие. Формула Фрая и Пага справедлива для следующих интервалов изменения величин T , S , P : $-3^\circ\text{C} < t < 30^\circ\text{C}$, $33,1\text{‰} < S < 36,6\text{‰}$, $1,03 \text{ кг/см}^2 < P < < 10^3 \text{ кг/см}^2$.

Наряду с формулой Фрая и Пага, существует ряд других эмпирических формул, в которых поправки описываются полиномами различных степеней давления, температуры, солености.

Изменение температуры воды на 1°C изменяет $C_{\text{зв}}$ на 3 м/с, изменение солености S на 1‰ приводит к изменению величины $C_{\text{зв}}$ на 1,2 м/с, а возрастание или убывание давления на 1 атм изменяет $C_{\text{зв}}$ на 0,2 м/с. Наибольшее изменение скорости звука в море вызывает изменение температуры морской воды. В реальных условиях изменения параметров морской воды скорость звука меняется в пределах

$$C_{\text{зв}} = 1440 \div 1540 \text{ м/с}.$$

Первые научные упоминания о распространении звука в воде есть уже в трудах Леонардо да Винчи: «Если ты, будучи на море, опустишь в воду отверстие трубы, а другой конец ее приложишь к уху, то услышишь идущие вдали корабли». Этим замечанием Леонардо предвосхитил современную практику подводного подслушивания кораблей, и можно только удивляться его прозорливости, так как корабли его эпохи — это гребные и парусные суда, которые были гораздо менее шумными, чем современный флот. После Леонардо да Винчи пройдет три с

лишним вска, прежде чем Араго, а затем Колладен вновь обратят внимание на то, что вода отлично проводит звук и что это обстоятельство можно использовать для практических целей.

Шумы в океане

На рис. 11.1 приведены спектрограммы шумов моря различного происхождения. Область I — область шумов, возникающих под действием ветровых волн (две кривые — для волн при

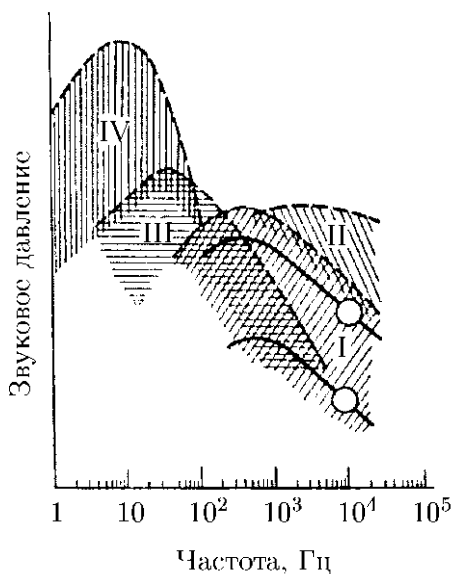


Рис. 11.1. Спектрограмма шумов моря различного происхождения: I — шумы ветрового волнения; II — шумы дождя и снежных зарядов; III — шумы судоходства; IV — шумы от землетрясений и турбулентных движений на границе атмосферы и воды

ветре 1 балл и 8 баллов по шкале Бофорта) — шумы от бегущих волн, их столкновения и разрушения. Область II — шумы в море при сильных ливнях, снегопадах и интенсивных снежных зарядах. Причиной шумов в области III является судоходство — каждое судно оставляет звуковой след в океане, который слабо затухает и распространяется на большие расстояния. Область IV — шумы от землетрясений, моретрясений, подводных взрывов, шумы от турбулентных движений на границе океан-атмосфера. Левая часть спектрограммы заходит в инфразвуковую область, не воспринимаемую ухом человека. Энергия этих шумов очень велика (больше чем от остальных источников во много тысяч раз). Затухание

слабое и, как следствие этого, наибольшее распространение по дальности.

Источником шумов являются также населяющие море живые организмы: креветки щелкают; режут, свистят и даже чирикают белуги (ревет как белуга); лает ставрида Черного моря; издает звуки цокающих лошадиных копыт кефаль; пищит и мурлыкает сельдь. Океан — не мир безмолвия, а мир без Солнца — так

назвал его замечательный исследователь Мирового океана Жак Ив Кусто.

Поглощение и рассеяние звука в океане

В процессе распространения звука в океане звуковая энергия поглощается и рассеивается. Поглощение в среде приводит к экспоненциальному убыванию амплитуды звукового давления $p(R)$ при увеличении расстояния R от излучателя:

$$p(R) = p(0) e^{-\tilde{\beta} R}. \quad (11.2)$$

Здесь $\tilde{\beta}$ — коэффициент поглощения, он измеряется в неперах на километр (Нп/км) и является функцией температуры; R измеряется в километрах.

Причиной поглощения являются воздушные пузырьки, морские организмы с газовыми включениями, дно. Обычно для характеристики влияния газовых включений на затухание звука приводят пример с двумя наполненными до краев бокалами шипучего вина — в одном вино отстоявшееся, в другом свеженалитое. Звон у первого бокала при постукивании сильнее, чем у второго — пузырьки газа гасят звук.

Ослабление звука по мере распространения его в океане обусловлено не только процессом поглощения, но и процессом рассеяния. Закон рассеяния звука в море имеет вид

$$p(R) = p(0) e^{-\chi R}, \quad (11.3)$$

где χ — коэффициент рассеяния (измеряется в Нп/км).

Причины рассеяния — воздушные пузырьки, возникающие как продукт жизнедеятельности планктона, а также при волнении и штормах; мелкомасштабные температурные неоднородности; шероховатость морской поверхности, вызванная волнением; скопления мелких морских животных, образующие звукорассеивающие слои в глубинах Мирового океана; флуктуации показателя преломления звуковых лучей.

Поглощение и рассеяние звука приводят к экспоненциальному убыванию амплитуды звуковой волны по мере удаления от излучателя. В натурных условиях в океане часто невозможно разделить эффектов поглощения и рассеяния. Совместное действие *поглощения* и *рассеяния* звука приводит к экспоненциальному убыванию амплитуды звукового давления по мере удаления от излучателя — *затуханию*:

$$p(R) = p(0) e^{-\tilde{K} R}, \quad (11.4)$$

где $\tilde{K}$ — коэффициент затухания (Нп/км).

Согласно экспериментальным данным и теоретическим расчетам затухание звука зависит от частоты звуковых колебаний: звук низких частот затухает меньше, т.е. распространяется на большие расстояния. Затухание акустических волн в морской воде больше, чем в пресной.

Распространяясь в океанах и морях, звуковые волны испытывают отражение от дна и на границе раздела вода–воздух. Отражение звука от границы вода–атмосфера является «мягким» — происходит смена фазы звукового сигнала на противоположную, в результате чего результирующее звуковое давление на границе раздела вода–воздух становится равным нулю. Граница вода–воздух — это полностью отражающая граница. Поверхность моря, как правило, взволнованная, что приводит к диффузному отражению звуковых волн (наряду с зеркальным) и увеличивает их затухание. Наличие большого количества пузырьков воздуха в приповерхностном слое океана также усиливает затухание звука.

Дно океанов и морей отражает звуковые волны по-разному и его отражающие свойства характеризуют коэффициентом отражения — отношением звукового давления в отраженной волне к звуковому давлению в падающей волне.

Выше уже упоминалось, что скорость звука в морской воде зависит от ее температуры, солености и давления (или глубины), т.е. $C_{зв} = f(T, S, P)$. Существующее в океане вертикальное распределение T , S и гидростатического давления P по глубине приводит к формированию вертикального распределения $C_{зв}$, характеризующегося наличием минимума, расположенного на некоторой глубине (в Атлантике на глубинах от 1200 до 2000 м, в Тихом океане — от 500 до 700 м, в полярных широтах — около самой поверхности). Пример такого распределения $C_{зв}$ приведен на рис. 11.2. Оказалось, что для распространения звука

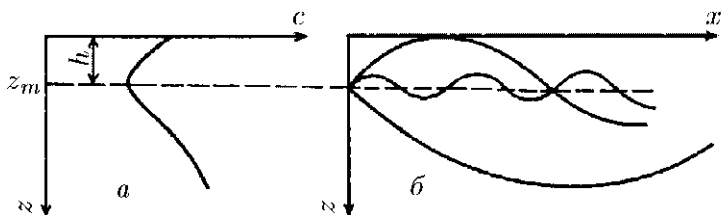


Рис. 11.2. Распределение по вертикали скорости звука, наиболее часто встречающееся в глубоководных районах морей и океанов (а), и формирование звукового канала (б)

в океане наиболее важное значение имеет не абсолютное значение $C_{зв}$, а профиль кривой $C_{зв}(z)$, т. е. вид вертикального распределения $C_{зв}$; а именно положение экстремумов на этой кривой, соотношение значений $C_{зв}$ у дна, у поверхности океана и в экстремальных точках, распределение градиентов $\frac{dC_{зв}}{dz}$ с глубиной и т. д. Профиль $C_{зв}(z)$ по существу и определяет условия распространения звука в океане. При одном типе профиля скорости звука от глубины $C_{зв}(z)$ дальность распространения звука может достигать сотен и тысяч километров, при другом профиле — лишь нескольких километров.

Для глубоководных районов океана типичен профиль $C_{зв}(z)$ вида, приведенного на рис. 11.2, т. е. профиль с минимумом, расположенным на некоторой глубине z_m . Вверх от z_m скорость $C_{зв}$ растет вследствие роста температуры T , вниз от z_m величина $C_{зв}$ увеличивается из-за роста давления P . Наличие минимума $C_{зв}$ приводит к формированию интереснейшего явления — возникновению подводного звукового канала. Создаются условия, благоприятные для дальнего распространения звука, — звуковые волны не рассеиваются на поверхности океана и не поглощаются в донном грунте. Из факторов, ослабляющих звуковое давление, остается только поглощение в морской воде. Для низких частот, для которых поглощение в воде невелико, дальность распространения звука может составлять несколько тысяч километров. Звук спокойно мог бы обогнуть весь земной шар, если бы ему не мешали материки. Почти повсеместное существование в Мировом океане звукового канала было использовано для создания гидроакустической системы спасения людей, попавших в катастрофу на море (СОФАР). Легчики, оказавшиеся на поверхности моря, моряки, терпящие бедствие, сбрасывали в воду специальные глубинные бомбы, которые взрывались на глубине расположения звукового канала. Звук взрыва, зарегистрированный на нескольких береговых станциях, позволял точно определить положение терпящих бедствие.

Ход звуковых лучей в подводном звуковом канале может быть рассчитан с помощью лучевой теории, в основе которой лежит предположение, что звуковая энергия в среде распространяется вдоль некоторых линий — лучей. Если излучатель поместить на оси звукового канала, то при определенных условиях лучи, вышедшие из этого источника под разными углами скольжения, снова соберутся в одну точку, т. е. сфокусируются. Таким образом, подводный звуковой канал действует на звуковые лучи как собирающая линза.

Скорость звука $C_{\text{зв}}$ по горизонтали в океане изменяется существенно меньше, чем по вертикали, и можно считать, что акустические свойства среды меняются только по z . Океан — слоисто-неоднородная среда. Как же распространяется звук в таких средах?

Для плоских акустических волн, которые падают на границу раздела двух сред под углом Θ_i , имеют место те же законы отражения и преломления, что и в геометрической оптике. Закон Снеллуса гласит:

$$\sin \Theta_t = \frac{C_2}{C_1} \sin \Theta_i, \quad (11.5)$$

где Θ_t — угол преломления. Если звуковые волны переходят из среды с меньшей скоростью звука C_1 в среду с большей скоростью C_2 ($C_2 > C_1$), то они отклоняются вверх от направления распространения, т. е. имеет место положительная рефракция. Если же распространение идет из среды, где скорость звука C_1 , в среду, в которой скорость звука C_2 , но при этом $C_2 < C_1$, то отклонение лучей происходит вниз от направления их распространения и тогда говорят об отрицательной рефракции. В первом случае (при положительной рефракции) есть $\Theta_{i_{\text{пред}}}$, при котором

$$\sin \Theta_{i_{\text{пред}}} = \frac{C_1}{C_2}, \quad (11.6)$$

и, если $\Theta_i > \Theta_{i_{\text{пред}}}$, то отражение полное и звуковая волна во вторую среду не проходит. В случае, когда звук идет из воздуха в воду,

$$\sin \Theta_{i_{\text{пред}}} = \frac{330}{1500} = 0,22 \quad (11.7)$$

и

$$\Theta_{i_{\text{пред}}} = 12,7^\circ. \quad (11.8)$$

При $\Theta_i > 12,7^\circ$ звук из воздуха в воду не пройдет.

Если разбить толщу моря на тонкие слои и в пределах каждого из них считать $C_{\text{зв}} = \text{const}$, то расчетным путем можно показать, что при распространении звука в слоисто-неоднородной среде звуковой луч будет отклоняться в сторону меньшей скорости его распространения.

Рассмотрим ряд случаев.

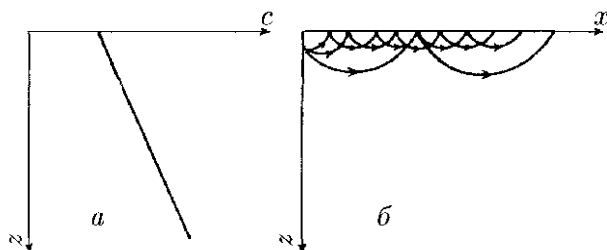


Рис. 11.3. Распределение скорости звука, типичное для глубоководных районов моря при постоянстве по глубине температуры и солености в дневные часы весенне-летнего периода (а) и соответствующая ему положительная рефракция звуковых лучей (б)

1. Скорость звука постоянна (не меняется с глубиной). В этом случае рефракции нет и звуковые лучи будут прямолинейны. Такая картина наблюдается в мелководных водоемах в осенне-зимний период, когда развивается конвективная циркуляция, охватывающая весь водоем, и температура, и соленость воды выравниваются по глубине: $T' = \text{const}$ и $S = \text{const}$. Вследствие мелководности влияние давления невелико.
2. Температура $T' = \text{const}$ и $S = \text{const}$, но море глубокое и на $C_{зв}$ влияет глубина (т.е. давление). Распределение $C_{зв}(z)$ приведено на рис. 11.3. В этом случае рефракция будет положительная, у поверхности будет происходить отражение лучей и вблизи границы раздела в воде формируется своеобразный волновод, что увеличивает дальность распространения звуковых лучей.
3. Мелководье в весенне-летний период, когда идет прогрев с поверхности солнечными лучами. Распределения $C_{зв}$ в дневные и ночные часы приведены на рис. 11.4 и 11.5. Днем будет отрицательная рефракция, лучи будут отклоняться вниз, и дальность их распространения будет мала. Ночью же ситуация будет как в предыдущем случае: вблизи поверхности сформируется звуковой канал и дальность распространения звуковых лучей увеличится.

Зависимость скорости звука от температуры воды используется в методах акустической термометрии и акустической томографии, которые находят все большее применение. Основной

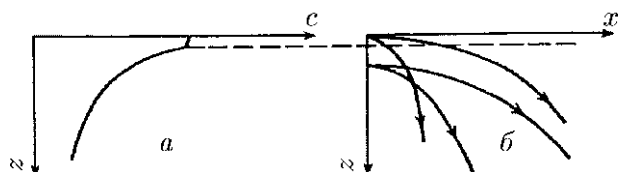


Рис. 11.4. Распределение скорости звука с глубиной в поверхностном слое мелководных районов моря в дневные часы весенне-летнего периода (а) и соответствующий этому распределению ход акустических лучей (отрицательная рефракция) (б)

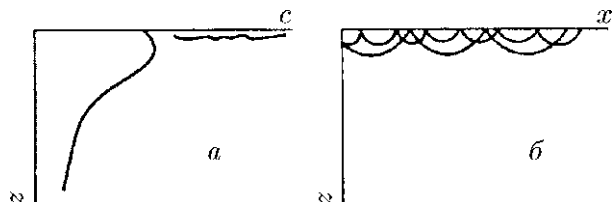


Рис. 11.5. Распределение скорости звука по глубине в ночные часы весенне-летнего периода (а) и соответствующее ему формирование поверхностного звукового канала (б)

принцип акустической томографии океана заключается в восстановлении структуры океанских неоднородностей по измерениям времени распространения сигналов вдоль отдельных лучей.

В середине 90-х годов XX века был осуществлен наиболее известный и крупный эксперимент по акустической термометрии АТОС (Acoustic Thermometry of Ocean Climate). Основная задача эксперимента состояла в длительных наблюдениях за крупномасштабной изменчивостью температуры воды в северной части Тихого океана с помощью измерения времени распространения акустических сигналов между несколькими излучателями и приемниками, расположенными на значительном трансокеанском удалении друг от друга.

На рис. 11.6 приведена схема расположения действующей и планируемых стационарных трасс акустической термометрии Северного Ледовитого океана (российско-американский эксперимент ACOUS — Arctic Climate Observations Using Underwater Sound). Акустический излучатель передает сигналы на частоте 20,5 Гц один раз в четверо суток, длительность сигнала

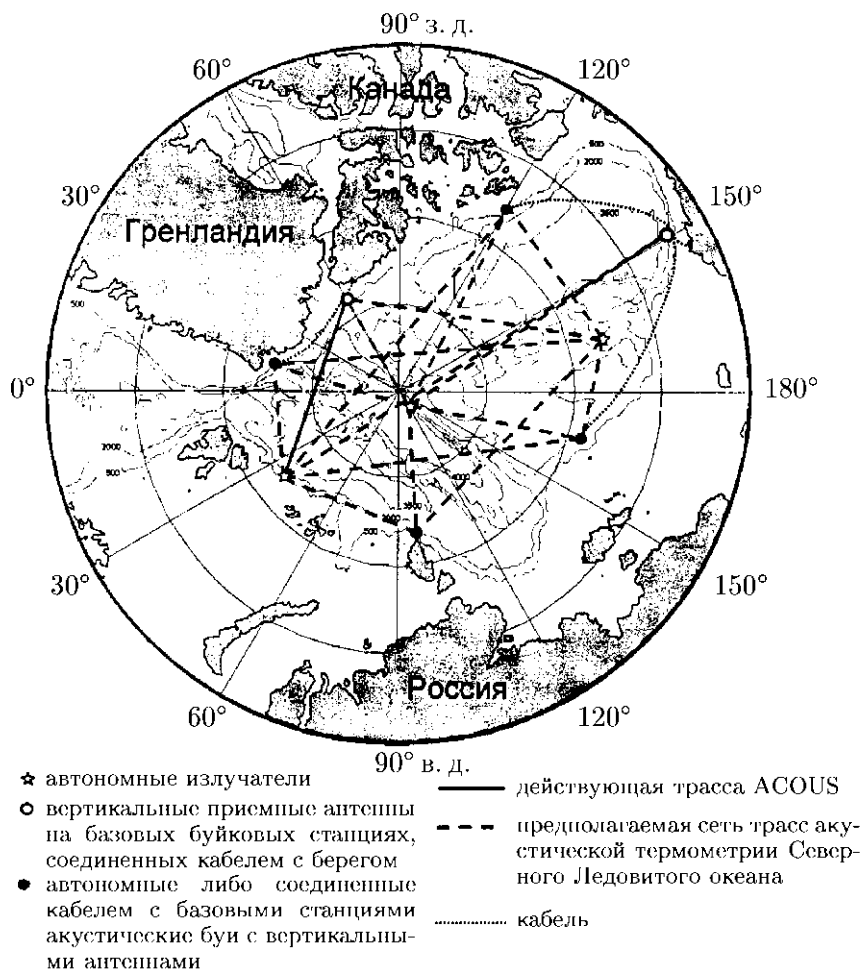


Рис. 11.6. Схема натурного эксперимента по использованию акустической термометрии для изучения крупномасштабных температурных неоднородностей вод Мирового океана

около 20 мин. Анализ данных, полученных в ходе первой стадии российско-американского эксперимента по трансарктическому акустическому распространению, позволил выявить потепление слоя атлантических вод вдоль трассы Шпицберген море Бофорта в среднем на $0,30^{\circ}\text{C}$ относительно среднеклиматических данных.

Выполненные исследования показали, что акустическая термометрия может быть мощным инструментом, позволяющим с

высокой точностью и непрерывно в течение практически неограниченного времени получать уникальные данные об изменении средней температуры глубинных вод океанов.

Реверберация и предреверберация звука в океане

После прекращения действия источника звука в море в течение определенного интервала времени в некоторой области пространства продолжает существовать акустическое поле, интенсивность которого убывает во времени. Это реверберация звука. Порождается реверберация неровностями дна и поверхности, неоднородностями, как то: скопления пузырьков воздуха из-за волн, пузырьками газов при гниении, мелкомасштабными температурными неоднородностями, взвешенными частицами. Различают объемную, поверхностную, донную реверберации, в зависимости от степени влияния тех или иных факторов. Морские организмы, вызывающие реверберацию, образуют звуко рассеивающие слои, которые могут иметь значительную протяженность, зависящую от биологической продуктивности. За время реверберации принимается время уменьшения интенсивности звука в 106 раз. Реверберация мешает работать гидроакустикам.

Сравнительно недавно открыто явление, противоположное реверберации — предреверберация. Это явление заключается в том, что при распространении звука в звуковом канале на больших расстояниях от источника звука перед приходом отдельных составляющих звуковых колебаний появляется звуковой фон, который опережает по времени приход основного сигнала. Уровень его не спадает с течением времени, а нарастает и достигает максимального значения в конце перед приходом основного сигнала. Причины этого явления — отражение и рассеяние сигнала на внутренних волнах, рассеяние от поверхностных волн, рассеяние и дифракция на больших градиентах $C_{зв}$, рассеяние на неоднородностях морской среды. Теория этого явления в отличие от реверберации не разработана до конца.

Глава 12

Структура и состав атмосферы. Внешние факторы

Состав и структура

Атмосфера представляет собой газовую оболочку (сферу) Земли. Слово «атмосфера» происходит от греческого слова «атмо», что означает пар или газ. Эта газовая оболочка играет важнейшую роль в существовании человечества и биосферы в целом. Существует несколько различных классификаций структуры атмосферы, названий областей, на которые разделяют атмосферу. Классификации могут строиться по различным признакам, например, по составу атмосферы, в частности, по преобладающим компонентам, ионному составу, а также по температурному ходу. Зависимость температуры от высоты определяет различные «сферы» уже внутри самой атмосферы.

Начиная от поверхности Земли температура атмосферы с высотой уменьшается, причем с примерно постоянным градиентом около $6,5^{\circ}\text{C}$ на километр. Ближайшая к Земле область атмосферы, где наблюдается такое линейное спадание температуры с высотой, называется тропосферой. Уменьшение температуры с высотой происходит до высоты примерно в 10 км, далее температура начинает возрастать. Область, где температурный ход меняет направление, называется тропопаузой. Высота тропопаузы зависит от многих факторов, прежде всего, от географической широты, сезона и солнечной активности. На полюсе высота тропопаузы находится в пределах 8–10 км, на экваторе — 16–18 км. Выше, в области стратосферы, температура растет примерно до высоты 50 км. Область, где температура перестает расти, на высоте около 50 км, называется стратопаузой. Выше расположена мезосфера, где температура снова убывает. Эта область простирается до высоты около 80–100 км, где находится мезопауза — самая холодная зона земной атмосферы. За мезопаузой находится термосфера, в которой температура растет с высотой и достигает 800–1000 К (в годы высокой солнечной активности может достигать 1500–2000 К и более).

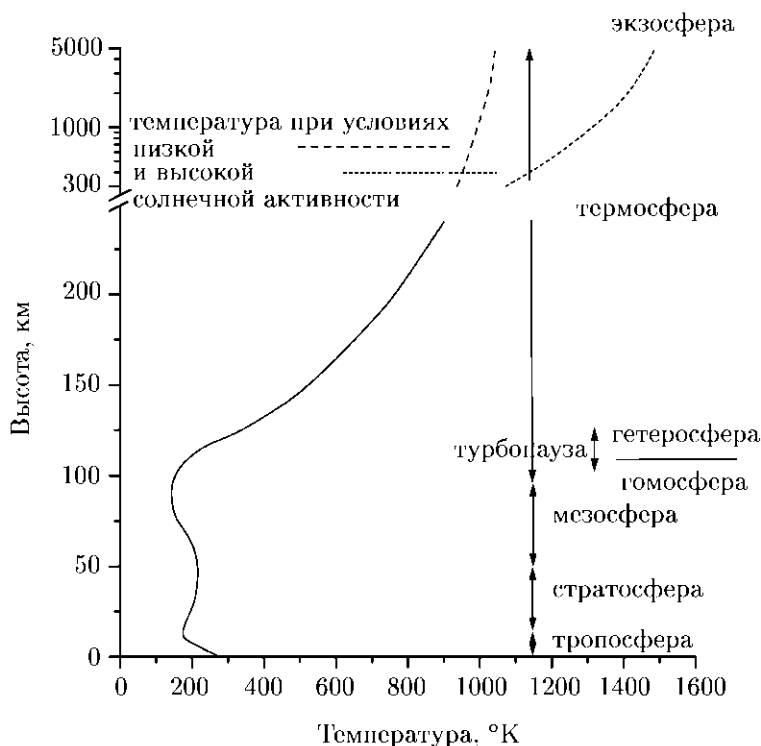


Рис. 12.1. Структура атмосферы. Сплошной линией изображена типичная высотная зависимость температуры атмосферы

Однако дальнейший рост температуры с высотой ограничен. На расстояниях в несколько радиусов Земли само понятие температуры теряет смысл, так как длина свободного пробега достигает масштабов радиуса Земли, и атомы и молекулы со скоростями, превышающими вторую космическую скорость, покидают земную атмосферу. Для этой части атмосферы используется термин «экзосфера». Кроме того, на больших высотах атомы и молекулы в основном ионизированы, т. е. ионов и электронов намного больше, чем нейтральных частиц, поэтому движение среды определяется в основном магнитным полем. Область околоземного пространства, где движение определяется в основном магнитным полем, именуется магнитосферой. Нередко условной нижней границей магнитосферы считают высоту около 1000 км, выше которой концентрация ионизованных компонент становится больше, чем нейтральных. На рис. 12.1 схематично изображена типичная

высотная зависимость температуры и соответствующая классификация структуры атмосферы. Температурная зависимость имеет два локальных минимума в тропопаузе и мезопаузе и локальный максимум в стратопаузе.

Почти вся приведенная терминология: мезосфера (средняя), термосфера, экзосфера (внешняя), магнитосфера и т. д. имеет греческое происхождение, кроме стратосферы. Strato по латыни обозначает слоистость.

Существует и другая классификация структуры атмосферы — по составу. До высот около 80–100 км выделяется гомосфера, а выше — гетеросфера. В гомосфере из-за турбулентного перемешивания относительный процентный состав газов практически не меняется, т. е. атмосфера остается однородной по составу. В гетеросфере турбулентное перемешивание компонент существенно слабее, и спадание каждой компоненты атмосферы происходит по «своей» барометрической формуле, поэтому относительный состав гетеросферы заметно меняется с высотой. Переходная область (80–110 км) между гомосферой и гетеросферой называется турбопаузой.

Состав воздуха в гомосфере практически не меняется и остается таким же, как в приземном слое. Преобладают азот (78%) и кислород (21%), около 1% инертного газа аргона. Вклад остальных постоянных компонент, перечисленных в табл. 12.1, существенно меньше. Однако несмотря на малое количество данные газы заметно влияют на многие атмосферные процессы. В частности, метан, составляющий всего $10^{-4}\%$, играет существенную роль в парниковом эффекте. Наряду с постоянными компонентами воздуха имеется ряд компонент, заметно меняющихся во времени и пространстве. К переменным компонентам относится вода/водяной пар — от 0 до 7%, озон, двуокиси углерода, серы и азота (табл. 12.2) [8, 142].

Таким образом, в атмосфере существует ряд газов, составляющих в совокупности десятые, сотые и менее доли процентов. Такие газы нередко называют «малыми» газами. Тем не менее, невзирая на свою «малость» данные газы оказывают заметное влияние на состояние атмосферы, погоду и климат. Это происходит потому, что эти газы существенно поглощают солнечное излучение разных областей спектра, что приводит к различным эффектам нагрева атмосферы, которые могут вызывать колебания атмосферы, парниковый эффект. Различные загрязнения, например фтор, хлор, бром и их соединения, накапливаются в атмосфере. Число их в процентном отношении ничтожно, но

Таблица 12.1. Постоянные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
азот	N ₂	28,016	78,110 ± 0,004
кислород	O ₂	31,9986	20,957 ± 0,001
аргон	Ar	39,942	0,937 ± 0,001
неон	Ne	20,182	(18,18 ± 0,04)10 ⁻⁴
гелий	He	4,003	(5,24 ± 0,004)10 ⁻⁴
криптон	Kr	83,80	(1,14 ± 0,01)10 ⁻⁴
ксенон	Xe	131,3	(0,087 ± 0,001)10 ⁻⁴
водород	H ₂	2,016	0,5 · 10 ⁻⁴
метан	CH ₄	16,043	2 · 10 ⁻⁴
закись азота	N ₂ O	44,015	(0,5 ± 0,1)10 ⁻⁴

Таблица 12.2. Переменные компоненты воздуха

Компонента	Формула	Относительная молекулярная масса	% объема
вода	H ₂ O	18,005	0–7
диоксид углерода	CO ₂	44,009	0,01–0,1 (у поверхности) среднее 0,032
озон	O ₃	47,998	0–0,01
диоксид серы	SO ₂	64,064	0–0,0001
диоксид азота	NO ₂	46,007	0–0,000002

тем не менее, они оказывают значительное влияние на химию и физику атмосферы.

Здесь полезно привести и сопоставить некоторые данные об атмосферах других планет, которые были получены с помощью советских космических аппаратов «Марс», «Венера» и американских космических аппаратов «Пионер», «Вояджер», «Маринер». В отличие от азотно-кислородной атмосферы Земли, в атмосфере Марса и Венеры преобладает углекислый газ, а на Юпитере и

Сатурне — водород и его соединения. Вблизи поверхности Венеры, Земли и Марса давление атмосферы находится примерно в отношении $100 : 1 : 0,01$, а температура равна 750, 300 и 250 К соответственно.

Рассмотрим распределение по высоте основных газов атмосферы. В области гомосферы общая концентрация меняется с высотой, но состав остается практически постоянным, т.е. все газы синхронно меняются по единой барометрической формуле, что иллюстрирует рис. 12.2, *а*. В гетеросфере начинается происходить физически очевидное изменение состава. На рис. 12.2, *б* сплошной кривой изображена в логарифмическом масштабе зависимость концентрации воздуха от высоты, а различными штриховыми кривыми изображены концентрации азота, кислорода, атомарного кислорода, аргона и гелия. Поскольку кислород тяжелее, его концентрация убывает несколько быстрее концентрации азота. На высоте около 120 км концентрация атомарного кислорода начинает превышать концентрацию молекулярного кислорода, а на высоте около 200 км и концентрацию азота. Иными словами, каждый газ меняется по своей отдельной формуле. Интересно, что атомарный кислород имеет даже локальный максимум концентрации, что связано с процессами ионизации, диссоциации, рекомбинации и соответствующего дрейфа. Таким образом, выше 80–100 км тяжелые газы «заканчиваются» быстрее, и относительная концентрация более легких газов возрастает. На больших высотах (рис. 12.2, *в*) преобладают атомарный кислород (200–600 км), гелий (600–1300 км), водород (выше 1300–1500 км). Приведенные кривые с рис. 12.2 представляют собой так называемые модели атмосферы: рис. 12.2, *б* — модель CIRA (COSPAR International Reference Atmosphere, 1972), рис. 12.2, *в* — та же модель распределения концентрации основных газов в термосфере на больших высотах при температуре экзосферы 800 К. Подобные модели неплохо описывают «усредненную» высотную структуру атмосферы, при этом концентрации газов зависят от температуры, особенно в термосфере, где температура определяется уровнем солнечной активности [8].

Сведения о распределении температуры, плотности и давления в атмосфере важно для многих военных и гражданских целей. Вариации плотности атмосферы действуют на поправку при стрельбе на дальние расстояния, на торможение летательных аппаратов и продолжительность жизни спутников. В частности, повышение интенсивности УФ излучения при высокой солнечной активности разогревает и расширяет верхнюю атмосферу. Возрастание плотности атмосферы на высоте спутника увеличивает

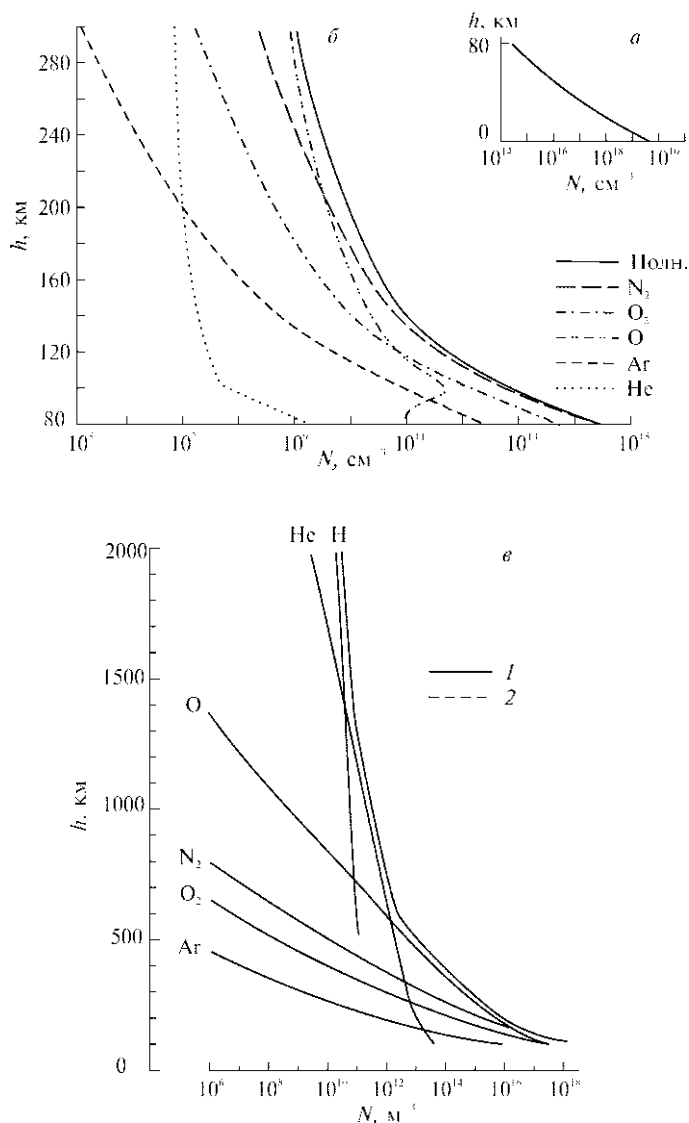


Рис. 12.2. Изменение с высотой в логарифмическом масштабе общей концентрации в области гомосферы (а); зависимости полной концентрации воздуха (сплошная кривая) и основных составляющих атмосферы (штриховые кривые) в гетеросфере (б); распределение концентрации основных газов (штриховые кривые) и полной концентрации воздуха (сплошная кривая) в термосфере при температуре экзосферы 800 К (модель COSPAR International Reference Atmosphere, 1972) (в)

торможение спутника и в конечном итоге меняет его орбиту. Например, в 1970-х гг. космическая станция «Скайлэб» после всплеска солнечной активности преждевременно произвела снижение и сгорела в нижних слоях атмосферы.

Существует довольно много моделей атмосферы, одна из которых приведена на рис. 12.2. Многие организации, университеты создавали свои модели атмосферы, часть из них принята за стандарты при ряде технических расчетов. Пример стандартной модели атмосферы СССР [9] приведен на рис. 12.3. Такие оцифрованные модели достаточно хорошо передают «усредненную» вертикальную структуру атмосферы, в частности температурный ход, вертикальный профиль давления и плотности. Сложнее обстоит ситуация с моделированием верхней атмосферы. Она хуже поддается модельному описанию, поскольку наряду с нейтральным газом здесь присутствует магнитоактивная плазма, которая весьма сложно реагирует на изменение внешних условий.

Солнечное излучение

Основным фактором, воздействующим и влияющим на атмосферу и на Землю вообще, является, безусловно, Солнце. Атмосфера, ее структура и состав во многом зависят от солнечного электромагнитного излучения как основного внешнего источника энергии. Существенно влияют на атмосферу и корпускулярные потоки солнечного ветра, солнечных и галактических космических лучей. Заметно влияют на атмосферу и другие внешние факторы, такие как гравитационные воздействия Солнца и Луны, магнитные, электрические поля Земли и т. д.

Здесь целесообразно привести некоторую информацию о Солнце, которая будет существенна в дальнейшем [137]. Солнце относится к классу карликовых спектральных звезд класса *G*. Радиус Солнца около 0,7 млн км, масса $m \approx 10^{30}$ кг. В Солнце сосредоточено 99,866% массы солнечной системы. Отношение массы Солнца к массе Земли равно 333 000. Средняя плотность Солнца составляет $\approx 1,4$ г/см³, светимость $\approx 4 \cdot 10^{26}$ Вт. Это огромная мощность. Для сравнения: энергия мегатонной бомбы равна $4 \cdot 10^{15}$ Дж. Таким образом, мощность Солнца эквивалентна 10^{11} мегатонных бомб каждую секунду. Основной источник энергии Солнца — термоядерные реакции, т. е. реакции, в которых участвуют ядра водорода, гелия и т. д. Например, термоядерные реакции углеродного цикла. Известно, что спектр излучения Солнца близок к спектру излучения абсолютно черного тела. Тонкий поверхностный (всего ≈ 350 км)

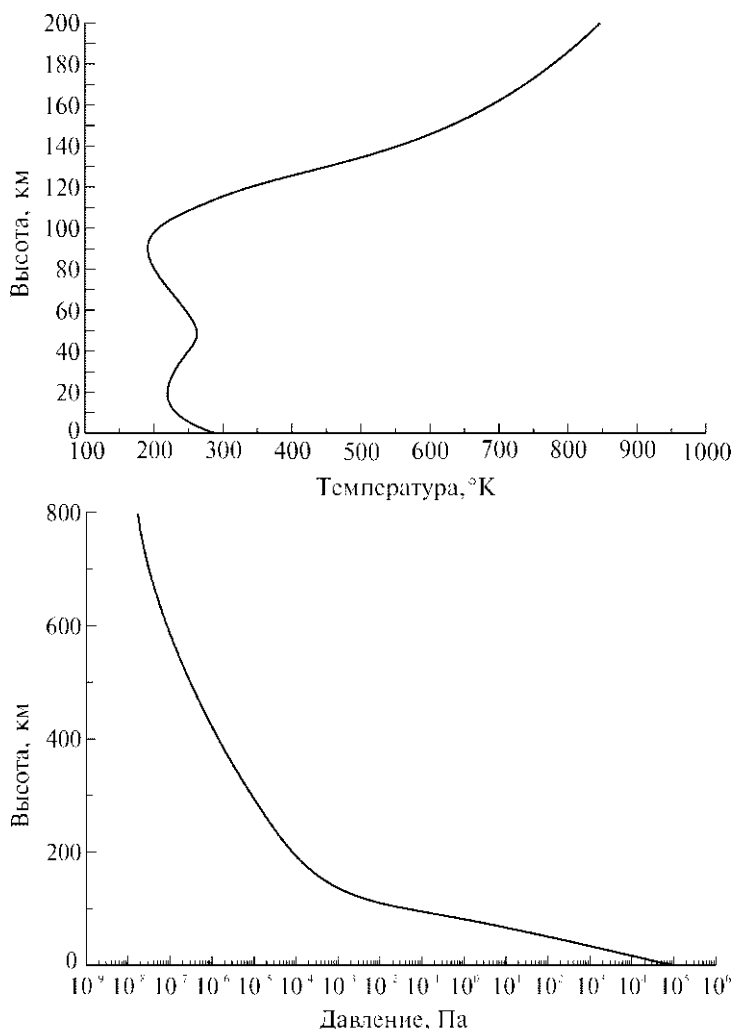


Рис. 12.3. Стандартная атмосфера СССР. Температура и давление в зависимости от высоты

излучающий слой Солнца называется фотосферой. Температура фотосферы около шести тысяч градусов, плотность составляет 10^{-7} г/см³, иногда вводят более точную эффективную температуру поверхности фотосферы $T \approx 5780$ К. Следующая область — хромосфера также представляет собой тонкий в масштабах Солнца слой, толщиной ≈ 1500 км, с достаточно

сложной структурой. Здесь температура порядка 10 000 К. Выше, на расстояниях в несколько солнечных радиусов, простирается внутренняя корона Солнца. Температура короны около полутора миллиона градусов.

Рассмотрим кратко основные законы теплового излучения, определяющие спектральную плотность излучения Солнца. Закон Кирхгофа утверждает, что отношение испускательной и поглощательной способности тела не зависит от природы тела и равно испускательной способности абсолютно черного тела. Напомним, что испускательная способность — это поток энергии, излучаемый единицей поверхности. Поглощательная способность определяется отношением поглощенного потока к падающему. Чисто термодинамическими методами Кирхгоф в конце XIX века доказал этот закон. И как это ни парадоксально звучит, излучение Солнца близко к излучению абсолютно черного тела. Термин «абсолютно черное тело» означает, что всякое падающее на тело излучение им полностью поглощается. Соотношение для спектральной плотности равновесного излучения абсолютно черного тела было получено Планком в начале XX века. Плотность равновесного излучения, как функция частоты нарастает как кубическая функция при малых частотах, далее имеется максимум, затем функция спадает по экспоненте. Таким образом, излучающее тело имеет максимум плотности излучения на некоторой частоте, причем положение максимума зависит от температуры: чем большую температуру будет иметь тело, тем большую частоту будет иметь максимум излучения. Формулу можно переписать через длину волны, тогда длина волны λ_m , для которой спектральная плотность излучения максимальна, обратно пропорциональна температуре. При этом константа пропорциональности с точностью до числового множителя порядка единицы равна произведению постоянной Планка на скорость света, деленному на постоянную Больцмана:

$$\lambda_m T = \text{const} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}. \quad (12.1)$$

Отсюда получается, что Земля, которая находится при температуре $T \approx 300 \text{ К}$, излучает с максимумом спектральной плотности на длине волны $\lambda_m \approx 10^{-5} \text{ м}$ (инфракрасное излучение). Солнце при температуре $T = 6000 \text{ К}$ имеет спектральный максимум на длине волны $\lambda_m \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (оранжевая область спектра). Таким образом, определяя спектральный максимум излучения тела, можно определить температуру равновесно излучающего тела, собственно говоря, так и была впервые определена

температура фотосферы Солнца. Температура солнечной короны значительно выше, она превышает 10^6 К, при этом максимум излучения приходится на рентгеновский диапазон с $\lambda_m = 2$ нм. Здесь полезно напомнить еще один пример равновесного теплового излучения — реликтовое излучение с максимумом на длине волны $\lambda_m = 1$ мм, что соответствует температуре $T = 3$ К. Предполагается, что после первоначального Большого взрыва первичного акта возникновения Вселенной, вещество отделилось от поля, и поле равновесного теплового излучения эволюционировало и остывало само по себе. Отметим, что проводя наблюдение Солнца в разных диапазонах волн, мы будем видеть фактически разные оболочки Солнца. В рентгеновском — корону, в оптическом — фотосферу, в ультрафиолете — хромосферу и фотосферу.

На рис. 12.4 схематично изображен спектр Солнца от 0,1 нм до 10 м при различных условиях на Солнце. В видимом и инфракрасном диапазонах спектр излучения близок к спектру равновесного излучения абсолютно черного тела с температурой $T \approx 5780$ К. В годы высокой солнечной активности наблюдается увеличение спектральной мощности излучения в области ультрафиолета, рентгена и радиоволн. По энергетике солнечные вспышки по отношению к полной энергии, излучаемой Солнцем, представляют собой сравнительно малые вариации (10^{-4} – 10^{-5}), тем не менее, они существенно влияют на многие процессы на Земле, в том числе на состояние биосферы, погоду и климат. Спектральная плотность солнечного излучения на поверхности Земли отличается от спектра излучения Солнца. После прохождения через атмосферу спектр солнечного излучения существенно изменяется из-за поглощения различными атмосферными газами, до Земли доходит спектр, изрезанный линиями поглощения. Солнечные спектры во внешней атмосфере и на уровне моря приведены на рис. 12.5. Рядом с полосами поглощения отмечены поглощающие газы.

Если проинтегрировать спектральную плотность распределения энергии по всем частотам, то в результате получится, что полная (на всех частотах) излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени температуры:

$$P_{\odot} = \sigma T^4.$$

Это соотношение носит название закона Стефана–Больцмана. Отсюда излучательная способность Солнца составляет около 70 МВт с каждого м^2 , что сопоставимо с мощностью большой электростанции. Естественно, основная часть излучается с

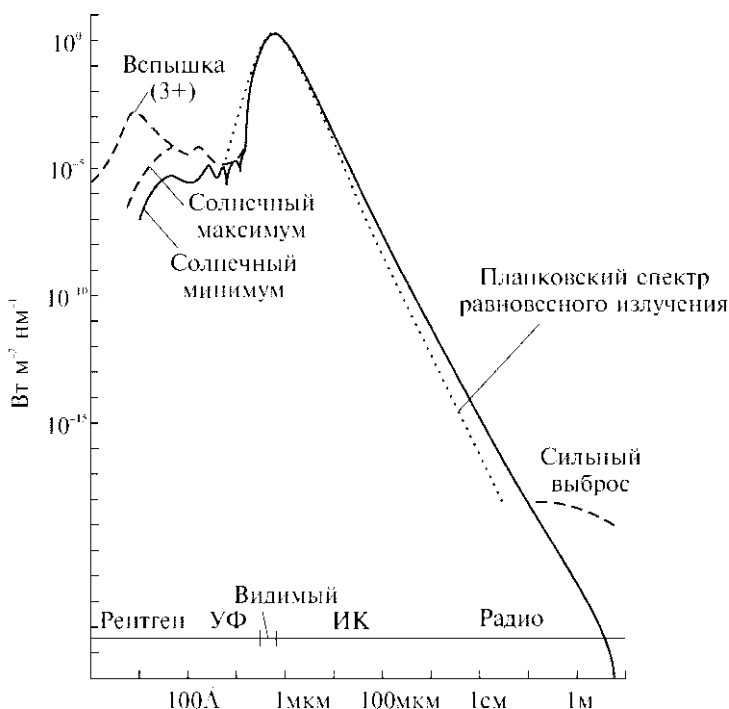


Рис. 12.4. Солнечный спектр от $1 \text{ \AA}$ до 10 м при различных условиях на Солнце

поверхности фотосферы. Светимость Солнца представляет собой полную энергию, которую излучает Солнце в единицу времени. Светимость равна произведению мощности, излучаемой с единицы площади, на площадь поверхности Солнца, и составляет $L = 3,86 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$.

Солнечная постоянная и оценка температуры Земли

Солнечная постоянная $S_{\odot}$ определяется как плотность потока энергии солнечного излучения на среднем расстоянии от Земли до Солнца (за пределами земной атмосферы). Она пропорциональна потоку излучения с единицы поверхности Солнца и отношению радиуса Солнца к расстоянию от Земли до Солнца. Теоретические оценки, связанные с моделью черного тела, т.е. с законом Стефана Больцмана, дают $S_{\odot} = (1373 \pm 14) \text{ Вт/м}^2$. Внеатмосферные измерения показали близкий результат $S_{\odot} = (1367 \pm 6) \text{ Вт/м}^2$.

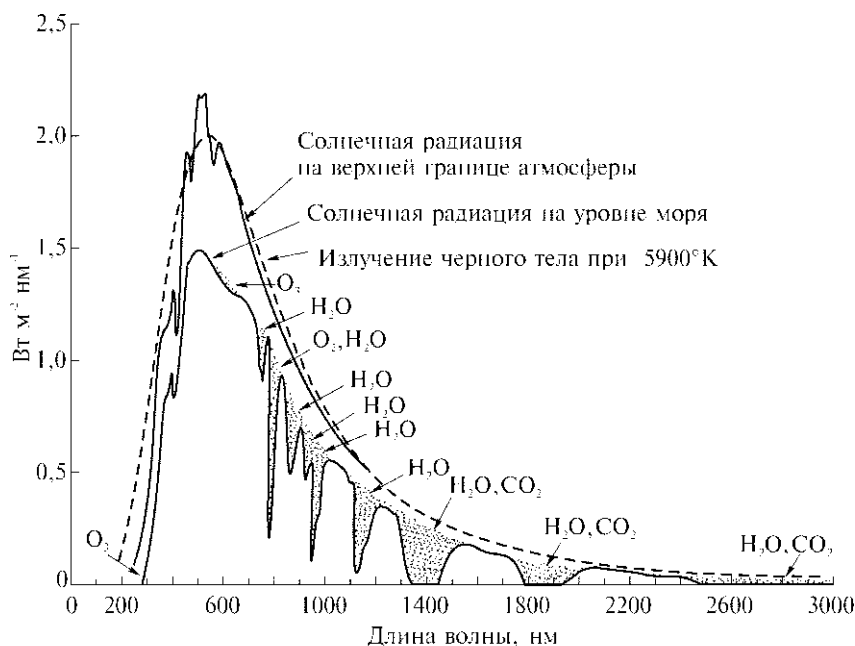


Рис. 12.5. Энергетический спектр Солнца и полосы поглощения атмосферы Земли (точки). Около каждой полосы поглощения указаны поглощающие газы

На основе приведенных общих соотношений для равновесного теплового излучения можно дать оценку температуры Земли (какой она должна быть, если в стационарном режиме поглощаемая Землей солнечная энергия далее переизлучается нашей планетой). Отметим, что солнечное излучение, поглощаемое Землей, имеет спектральный максимум в высокочастотном оптическом диапазоне, а переизлучаемое Землей излучение имеет спектральный максимум в другом, менее высокочастотном — инфракрасном диапазоне спектра. Полный поток равновесного теплового солнечного излучения поглощается на площади сечения Земли $\pi R_{\oplus}^2$ и частично отражается с коэффициентом отражения A (альбедо Земли). В стационарном режиме этот поток равен потоку $\Phi_{\oplus}$ излучаемого Землей равновесного теплового излучения, который представляет собой произведение площади поверхности Земли $4\pi R_{\oplus}^2$ на мощность излучения Земли в соответствии с законом Стефана–Больцмана:

$$S_{\odot} \pi R_{\oplus}^2 (1 - A) = \Phi_{\oplus} = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4. \quad (12.2)$$

Перепишем соотношение для солнечной постоянной $S_{\odot}$ через мощность, излучаемую единицей поверхности Солнца, умноженную на отношение квадрата радиуса Солнца $R_{\odot}$ к квадрату расстояния Солнце–Земля D :

$$S_{\odot} = P_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^2.$$

Тогда

$$\left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^2 P_{\odot} (1 - A) R_{\oplus}^2 = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4.$$

Мощность, излучаемая единицей поверхности Солнца, по закону Стефана–Больцмана пропорциональна четвертой степени температуры Солнца:

$$\left(\frac{R_{\odot}}{D} \right)^2 \sigma T_{\odot}^4 (1 - A) R_{\oplus}^2 = 4\pi R_{\oplus}^2 \sigma T_{\oplus}^4.$$

Отсюда следует оценка температуры Земли:

$$T_{\oplus} = T_{\odot} \sqrt{\frac{R}{2D}} (1 - A)^{1/4} \approx 255 \text{ К}. \quad (12.3)$$

Вычисления для типичного значения $A \approx 0,3$ дают оценку температуры Земли около $T \approx 255 \text{ К} \approx -18^{\circ}\text{С}$. Эта цифра была бы верна в отсутствие атмосферы Земли. При наличии атмосферы возникает так называемый парниковый эффект. Часть атмосферных газов пропускает полностью высокочастотное видимое оптическое излучение, но поглощает инфракрасное излучение, тем самым происходит дополнительный нагрев атмосферы до температуры около 290 К. Более подробно парниковый эффект и проблемы потепления климата будут рассмотрены далее в главах 14 и 20.

В заключение приведем некоторые сведения об истории изучения атмосферы. Еще в XIX веке Жоффруа Сент-Илер, Типдалл, Аррениус, Чамберлин высказывали и развивали идеи о существенных изменениях атмосферы в геологическом прошлом. Отмечалось, что поскольку углекислый газ наряду с водяным паром поглощает излучение в атмосфере, изменения концентрации CO_2 могли быть одной из причин, приводивших к изменениям климатических условий в прошлом, в частности, изменения количества углекислого газа могли быть причиной четвертичных оледенений. Анализируя материалы геологических исследований, Аррениус отмечал, что количество

углекислого газа в современной атмосфере составляет малую часть того углекислого газа, который в прошлом был поглощен из атмосферы и израсходован на формирование карбонатных пород. В связи с этим Аррениус заключил, что концентрация углекислого газа в атмосфере могла изменяться в широких пределах, что оказывало существенное влияние на климат, достаточное для возникновения и исчезновения оледенений. Аррениус подчеркивал связь концентрации углекислого газа с переменным уровнем вулканической активности. Он предполагал, что в эоцене и миоцене имело место усиление вулканической деятельности, сопровождавшееся ростом концентрации CO_2 и повышением средней температуры воздуха. Одновременно с этим увеличивалась продуктивность фотосинтеза. По мнению Аррениуса, средняя температура воздуха в эоцене из-за усиления парникового эффекта была выше современной на $8-9^\circ\text{C}$. Аррениус считал, что интенсивное развитие растительного покрова на континентах в каменноугольном периоде объяснялось повышением концентрации углекислого газа в атмосфере и привело к увеличению массы атмосферного кислорода. Отметим, что эти заключения Аррениуса совпадают с современными результатами, показывающими оценки средней температуры воздуха для эоцена выше современной температуры на $8,5^\circ\text{C}$ [19].

Глава 13

Основы термодинамики атмосферы

Уравнения состояния

Основным действующим на атмосферу внешним фактором является Солнце. Под воздействием солнечного излучения происходят разнообразные процессы переноса энергии, тепла и вещества между разными областями атмосферы и другими геосферами. Атмосфера, в основном, заполнена воздухом и примерный молекулярный вес воздуха, как хорошо известно, равен 29, что несколько больше молекулярного веса основной компоненты воздуха — азота N_2 , равного 28. Небольшое превышение молекулярного веса воздуха над молекулярным весом азота связано с тем, что следующая по объему компонента — кислород O_2 имеет больший молекулярный вес 32.

Уравнение состояния воздуха с большой точностью описывается уравнением состояния идеального газа:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (13.1)$$

где объем V , масса воздуха m , молекулярная масса μ измеряются в обычных единицах системы СИ, R — универсальная газовая постоянная. Давление P традиционно измеряется в барах, причем, бар выражается следующим образом через стандартные единицы Н (ньютон) и Па (единица давления паскаль равна силе в ньютонах, деленной на площадь в m^2):

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 10^5 \text{ Н/м}^2 \approx 1 \text{ кг/см}^2.$$

Часто используется единица давления атм (атмосфера), равная 1 кг/см^2 и близкая к одному бару.

Здесь целесообразно напомнить некоторые полезные для дальнейшего цифры. Часто выделяют так называемые «нормальные условия»:

$$P = 101325 \text{ Па} \approx 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$T = 273,15 \text{ К} \approx 273 \text{ К},$$

$$V_0 = 2,2414 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \approx 22,4 \text{ л}.$$

Они представляют собой некоторые типичные, «нормальные» значения атмосферного давления и температуры 0°C , т. е. примерно 273 K . При этом объем одного моля идеального газа составляет $2,24 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3$, или $22,4$ литра.

Чаще в физике атмосферы используется другая форма записи уравнения состояния, содержащая плотность воздуха ρ . Уравнение следует из (13.1), если поделить на объем правую часть. Нередко используется не универсальная газовая постоянная R , а газовая постоянная для воздуха R_a , нормированная на молекулярный вес воздуха μ :

$$P = \rho \frac{R}{\mu} T = \rho R_a T, \quad (13.2)$$

где

$$R_a = \frac{R}{\mu} = \frac{8,31\text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})}{29 \cdot 10^{-3}\text{ кг}/\text{моль}} \approx 287\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}).$$

Отсюда плотность воздуха при нормальных условиях равна

$$\rho = \frac{P}{R_a T} \approx \frac{1,01 \cdot 10^5}{287 \cdot 273}\text{ кг}/\text{м}^3 \approx 1,29\text{ кг}/\text{м}^3.$$

Одним из самых существенных факторов, определяющих поведение атмосферы, является водяной пар — известный всем газ H_2O с молекулярной массой 18. Он присутствует в сравнительно небольших количествах в атмосфере, но в отличие от других компонент воздуха с водяным паром при типичных атмосферных температурах происходят фазовые переходы с выделением и поглощением тепла, поэтому его роль весьма значительна. Уравнение состояния воздуха при учете водяного пара меняется.

Напишем отдельно уравнение состояния для сухого воздуха с парциальным давлением P_a и уравнение состояния для водяного пара, где e обозначает так называемую упругость водяных паров, или парциальное давление водяного пара:

$$P_a = \rho_a R_a T,$$

$$e = \rho_w R_w T.$$

Здесь введена газовая постоянная для водяного пара $R_w = R/\mu_w$. Уравнение состояния для смеси сухого воздуха и водяного пара будет несколько отличаться от уравнения состояния для сухого воздуха. Суммарная плотность смеси ρ равна плотности сухого воздуха ρ_a плюс плотность воды ρ_w :

$$\rho = \rho_a + \rho_w = \frac{P_a}{R_a T} + \frac{e}{R_w T} = \frac{P - e}{R_a T} + \frac{e}{R_w T},$$

где плотности воздуха и водяного пара выражены через соответствующие уравнения состояния, при этом парциальное давление сухого воздуха заменено на разность давлений влажного воздуха (смеси) и пара, поскольку давление паров плюс давление сухого воздуха есть суммарное давление смеси. После тождественных преобразований получим формулу

$$\rho = \frac{P}{R_a T} \left[1 - \frac{e}{P} \left(1 - \frac{R_a}{R_w} \right) \right] = \frac{P}{R_a T} \left[1 - \frac{e}{P} \left(1 - \frac{\mu_w}{\mu_a} \right) \right].$$

Учитывая, что

$$1 - \frac{\mu_w}{\mu_a} = 1 - \frac{18}{29} \approx 0,38,$$

получим выражение для плотности:

$$\rho = \frac{P}{R_a T} \left(1 - 0,38 \frac{e}{P} \right).$$

Поскольку парциальное давление водяного пара, как правило, не превышает 30–50 мбар, оно мало по сравнению с давлением воздуха (~ 1 бар). Учитывая малость отношения $\frac{e}{P} \ll 1$, можно переписать уравнение состояния влажного воздуха в виде

$$P = \rho R_a T \left(1 + 0,38 \frac{e}{P} \right). \quad (13.3)$$

Сравнивая (13.2) и (13.3), нетрудно видеть, что присутствие водяных паров дает лишь небольшую поправку к уравнению состояния, которую можно интерпретировать как сдвиг температуры. Иногда вводится так называемая виртуальная температура, т. е. для воздуха с водяным паром можно заменить уравнение состояния (13.3) соотношением вида (13.2) с другой — виртуальной температурой. Иными словами, это температура сухого воздуха, имеющего такое же давление как влажный воздух. Виртуальная температура будет несколько больше, потому что молекулярный вес пара меньше. Если происходит добавление пара с замещением молекул воздуха, то смесь становится легче и плотность падает. А для того чтобы сухой воздух имел такую же плотность, нужно поднять его температуру, тогда его плотность уменьшится. Как упоминалось выше, давление водяных паров невелико, поэтому в ряде задач без фазовых переходов влиянием водяного пара на уравнение состояния можно пренебречь.

Термодинамические процессы в атмосфере

В атмосфере происходят различные термодинамические процессы, в частности, изотермические, адиабатические и другие знакомые по курсу молекулярной физики процессы. В основном атмосфера не изотермична, например, в тропосфере температура меняется с высотой довольно сильно, примерно на $6,5^\circ\text{C}$ на км. Но в областях тропопаузы, стратопазузы, мезопазузы в некоторых диапазонах высот ее приблизительно можно считать изотермичной.

Как известно, распределение давления и плотности в изотермической атмосфере определяется формулой Больцмана. Разность давлений в слоистой и статичной атмосфере обусловлена весом выделенного объема воздуха:

$$dP = -\rho g dz. \quad (13.4)$$

Ось z направлена вверх. Если заменить ρ выражением, полученным из уравнения состояния (13.2), то получим уравнение

$$\frac{dP}{P} = -\frac{g dz}{R_a T},$$

откуда после интегрирования следует формула Больцмана

$$P = P_0 \exp(-z/H),$$

где $H = \frac{R_a T}{g}$ — так называемая высота однородной атмосферы.

В соответствии с формулой Больцмана давление с высотой меняется экспоненциально, причем H определяет масштаб спада давления по высоте, т. е. на высоте H давление падает в e раз. Формула для плотности будет аналогичной, потому что при постоянной температуре плотность пропорциональна давлению. Высоту однородной атмосферы можно выразить и через массу m одной молекулы:

$$H = \frac{R_a T}{g} = \frac{RT}{\mu g} = \frac{kT}{mg}.$$

Численная оценка дает величину около 8 км:

$$H = \frac{R_a T}{g} \approx \frac{287 \cdot 273}{9,8} \approx 8000 \text{ м.}$$

Заметим, что уже на высотах в несколько километров спадание давления и плотности воздуха значительно, например, на высоте 2,5 км плотность составляет 70% от плотности на уровне моря.

Однако, как правило, в атмосфере происходят заметные изменения температуры с увеличением высоты, и приближение

изотермической атмосферы явно неприменимо. Более подходящим приближением при рассмотрении перемещения частиц воздуха является адиабатическое приближение. При таком анализе обычно выделяется малая частица, представляющая собой «физически бесконечно малый» объем, но достаточно большая, в том смысле, что она содержит много молекул. Иными словами, предполагается, что частица достаточно велика по сравнению с масштабами микроструктуры среды и достаточно мала по сравнению с внешними характерными масштабами задачи. Поскольку воздух — плохой проводник тепла и его теплопроводность низка, можно считать, что по мере перемещения этой частицы с потоком других частиц, с ветром, она слабо обменивается энергией с окружающей средой, т.е. можно использовать адиабатическое приближение. Такая простейшая модель, тем не менее, отражает основное физическое явление и объясняет многие процессы в атмосфере.

Рассмотрим адиабатический процесс в атмосфере. Первое начало термодинамики имеет вид

$$\delta Q = dU + \delta A = C_V dT + P dV. \quad (13.5)$$

Здесь приращение тепла δQ равно приращению внутренней энергии $dU = C_V dT$ плюс работа $\delta A = P dV$. Отметим, что в общем случае только приращение внутренней энергии dU является полным дифференциалом. Для частицы, которая будет перемещаться, не меняя своей энергии, можно написать $\delta Q = 0$, т.е. приток тепла равен нулю, взаимодействие с окружающей средой отсутствует или, по крайней мере, пренебрежимо мало за время этого перемещения. Если мы хотим получить зависимость $P(T)$, надо перейти от дифференциала dV к дифференциалу dP . Это несложно сделать, используя уравнение состояния идеального газа. Дифференцируя логарифм соотношения (13.1), получим

$$\frac{dP}{P} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T}.$$

Это так называемое тождество Майера. Далее, используя тождество Майера, заменяем дифференциал dV на dP в (13.5) и получаем уравнение адиабатического процесса:

$$\frac{C_P dT}{T} = \frac{R dP}{P}. \quad (13.6)$$

После интегрирования получается связь

$$\ln T = \frac{R}{C_P} \ln P + \text{const.}$$

Отсюда отношение температур равно отношению давлений в степени R/C_P . Универсальная газовая постоянная равна, как известно, разности теплоемкостей

$$R = C_P - C_V.$$

Тогда, заменяя R на разность $C_P - C_V$, получим для адиабатического процесса формулу

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(1-1/\gamma)},$$

в которой отношение температур есть отношение давлений в степени $1 - 1/\gamma$, где $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$. Воздух при нормальных условиях состоит в основном из молекул N_2 и O_2 . У таких двухатомных молекул при типичных атмосферных температурах колебательные степени свободы не возбуждаются, поэтому они имеют 5 степеней свободы и молярную теплоемкость при постоянном объеме $C_V = \frac{5}{2}R$, а молярную теплоемкость при постоянном давлении $C_P = \frac{7}{2}R$, тогда $\gamma = \frac{7}{5}$.

При адиабатическом подъеме, естественно, будет происходить охлаждение частиц воздуха. Давление в частице меняется так же, как и давление внешней среды. Частица — это условный элемент объема, в котором достаточно много молекул, и по мере перемещения воздуха давление в частице все время равно давлению среды. Но по мере подъема будет происходить изменение температуры частицы, и этот градиент температуры, полученный в адиабатическом приближении, называют адиабатическим градиентом температуры. Уравнение адиабатического процесса (13.6) связывает $\frac{C_P dT}{T}$ и $\frac{R dP}{P}$, заменяя приращение давления через гидростатическое равенство (13.4), получим уравнение для температуры при таком адиабатическом подъеме:

$$\begin{aligned} dT &= -\frac{g}{c_P} dz, \\ -\frac{dT}{dz} &= \frac{g}{c_P} \approx 10^{-2} \text{ К/м} = 10 \text{ К/км}. \end{aligned} \tag{13.7}$$

Адиабатический градиент температуры по высоте отрицателен и представляет собой отношение ускорения свободного падения g к удельной теплоемкости воздуха при постоянном

давлении $c_P = \frac{C_P}{\mu}$. Полученное численное значение градиента больше, чем в реальной атмосфере ($\approx 6,5$ К). Завышение величины температурного градиента связано с точностью адиабатического приближения, но, главное, здесь не учтено, что при конденсации водяного пара будет выделяться тепло и поднимающаяся частица будет охлаждаться слабее, т.е. рассмотренное здесь охлаждение сильнее, чем в реальной атмосфере.

Рассмотренные выше процессы относятся к сухоадиабатическим процессам. Название сухоадиабатический процесс не означает, что воздух сухой, он может содержать и водяной пар, но его уравнение близко к уравнению состояния сухого воздуха, пока не происходит выделения скрытой теплоты конденсации. Во влажноадиабатическом процессе происходит выделение скрытой теплоты. С выделением такой теплоты ситуация существенно меняется. В первом начале термодинамики для влажноадиабатического процесса будет фигурировать скрытая теплота δQ , отнесенная к массе, которая пропорциональна произведению относительного содержания dq (q — безразмерная величина) влаги в воздухе и удельной теплоты парообразования L . Поэтому выделение тепла (со знаком «минус», поскольку при $dq > 0$ тепло уходит из системы) определяется соотношением

$$\frac{\delta Q}{\mu} = -L dq = \frac{C_P}{\mu} dT - \frac{V}{\mu} dP = c_P dT - \frac{dP}{P}. \quad (13.8)$$

Подставляя сюда гидростатическое соотношение для приращения давления (13.4), получим

$$c_P dT + L dq = g dz$$

и далее аналогично (13.7)

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_P} - \frac{L}{c_P} \frac{dq}{dz}. \quad (13.9)$$

Итак, $\frac{dT}{dz}$ равен сухоадиабатическому градиенту минус добавка, в которую входит изменение относительного содержания пара в воздухе. Производную $\frac{dq}{dz}$ удобно переписать через производную по температуре:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_P} - \frac{L}{c_P} \frac{dq}{dT} \frac{dT}{dz}.$$

Отсюда для влажно-адиабатического градиента получаем формулу

$$\frac{dT}{dz} = - \frac{g}{c_p \left(1 + \frac{L}{c_p} \frac{dq}{dT} \right)}. \quad (13.10)$$

Добавок к единице в знаменателе представляет собой положительную величину, поскольку относительная плотность q с температурой растет. Получается, что влажноадиабатический градиент γ_s равен сухадиабатическому градиенту γ_a , деленному на величину, большую 1, т.е. он меньше сухадиабатического градиента:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_a}{1 + \frac{L}{c_p} \frac{dq}{dT}} < \gamma_a. \quad (13.11)$$

В качестве иллюстрации адиабатических процессов рассмотрим адиабатический подъем и последующее опускание частиц воздуха, например, при обтекании возвышенностей и гор (рис. 13.1, а). На рис. 13.1, б изображена диаграмма адиабатических процессов, иллюстрирующая изменение температуры

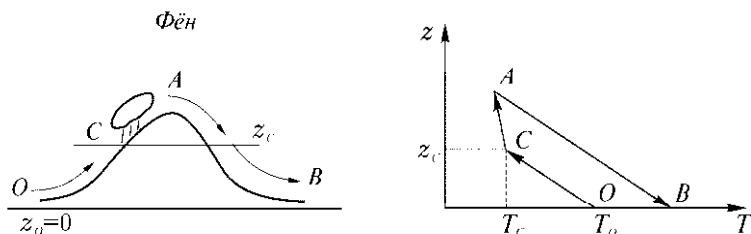


Рис. 13.1. Схема адиабатических процессов при обтекании гор

с высотой. При перемещении частицы вверх из точки O (с температурой T_0 на высоте $z = 0$) температура линейно падает. Когда температура уменьшается до температуры конденсации T_c , на высоте конденсации z_c образуется облако. Далее происходит выпадение осадков из этого облака и выделение скрытой теплоты конденсации, что уменьшает охлаждение воздуха. Поэтому у влажноадиабатического процесса (между точками C и A) наклон $\left| \frac{dT}{dz} \right|$ меньше, чем у сухадиабатического.

После того как выпадут все осадки, воздух становится сухим, и далее происходит спуск в долину (между точками A и B).

Из диаграммы несложно понять, что если стартовать с температуры T_0 , то завершится процесс с другой температурой T_B , которая всегда больше T_0 . Подобное выпадение осадков в горах и повышение температуры воздушного потока достаточно часто наблюдается в природе и хорошо иллюстрирует сухо- и влажноадиабатические процессы. Если осадки остаются на горе, то в долину спускается сухой и теплый воздух. Такой ветер называется фён.

Устойчивость атмосферы

Термодинамическую устойчивость атмосферы также можно рассмотреть в рамках адиабатического приближения. Устойчивость атмосферы зависит от вертикального профиля температуры. Предположим, что в неподвижном слое атмосферы температура линейно убывает с высотой Δz , например, как это происходит в тропосфере. Градиент температуры данного слоя характеризуется параметром β :

$$T = T_0 - \beta \Delta z.$$

Пусть малая частица воздуха поднимается адиабатически на высоту Δz , при этом ее температура будет меняться в соответствии с адиабатическим градиентом γ_a :

$$T' = T_0 - \gamma_a \Delta z.$$

Тогда разность температур частицы и окружающей среды будет равна

$$\Delta T = T' - T = (\beta - \gamma_a) \Delta z. \quad (13.12)$$

Учитывая, что давление в частице равно давлению окружающего воздуха, изменение плотности в соответствии с уравнением состояния (13.2) определяется разностью температур:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta T}{T}.$$

Отсюда знак вариации плотности определяется разностью адиабатического градиента и существующего в слое градиента температуры:

$$\Delta \rho = -\frac{\rho}{T} (\beta - \gamma_a) \Delta z = \frac{\rho}{T} (\gamma_a - \beta) \Delta z. \quad (13.13)$$

Поэтому при $\gamma_a < \beta$ частица становится менее плотной, чем окружающий воздух ($\Delta \rho < 0$), и возникает выталкивающая сила плавучести (архимедова сила), направленная вверх. В этом случае атмосфера находится в неустойчивом состоянии,

поскольку любая сместившаяся вверх частица будет продолжать это движение. При $\gamma_a > \beta$ частица становится более плотной, чем окружающий воздух ($\Delta\rho > 0$), и направленная вниз архимедова сила возвращает частицу обратно в исходное положение. Это случай устойчивого равновесия атмосферы. Особо устойчивые состояния атмосферы наблюдаются в так называемых слоях инверсии, когда $\beta < 0$ и температура возрастает с высотой. Температурные инверсии гасят вертикальные движения и конвекционные потоки, подавляют перемешивание воздуха. Такие инверсионные слои могут существовать достаточно длительное время и оказывать негативное влияние на состояние и экологию атмосферы, особенно в городах, поскольку приводят к накоплению загрязнений.

Глава 14

Основы динамики атмосферы.

Погода и климат

Динамика и глобальная циркуляция

В данном разделе речь пойдет о некоторых вопросах динамики атмосферы, о движении воздушных масс, о погоде и климате.

Первоначально проведем качественное рассмотрение движения воздушных масс. Из курса механики известно, что физические тела, находящиеся на вращающейся планете в неинерциальной системе координат, приобретают дополнительное поворотное, или кориолисово ускорение. Кориолисово ускорение $\mathbf{a}_K$ есть удвоенное векторное произведение угловой скорости вращения Земли $\mathbf{\Omega}$ на скорость тела $\mathbf{v}$ в неинерциальной системе координат:

$$\mathbf{a}_K = 2[\mathbf{\Omega} \times \mathbf{v}].$$

Уравнение относительного движения материальной точки в неинерциальной системе координат может быть записано формально подобно уравнению движения в инерциальной системе координат, но с введением соответствующих дополнительных сил инерции. Иными словами, в неинерциальной системе координат появляется некоторая эффективная сила инерции, действующая со знаком «минус» и равная произведению массы тела на дополнительное ускорение. В частности, для описания кориолисова ускорения вводится плотность кориолисовой силы

$$\mathbf{F}_K = -2\rho[\mathbf{\Omega} \times \mathbf{v}].$$

Следует отметить принципиальное отличие сил инерции от обычных сил взаимодействия тел, состоящее в том, что для них нельзя указать, действие каких конкретно тел на данное тело ими описывается. Однако, не вдаваясь в детали, отметим, что в Северном полушарии под действием кориолисовой силы всякий движущийся объект, независимо от направления движения, будет отклоняться при движении вправо. Соответственно в Южном полушарии объект будет отклоняться влево от направления движения. Кориолисово ускорение имеет и вертикальную составляющую, но при обычных в атмосфере скоростях движения, не

превышающих сотни метров в секунду, эта составляющая мала ($< 10^{-3}$) по сравнению с ускорением свободного падения g . При движении по экватору остается только вертикальная составляющая, и тело не отклоняется в горизонтальной плоскости. В остальных случаях при движении в горизонтальных направлениях кориолисова сила имеет существенное значение, во многих случаях она является определяющей.

Типичное поле давления воздуха на Земле неоднородно, оно имеет максимумы, минимумы, седловые точки. Неоднородность поля давления в атмосфере — следствие неоднородности поверхности планеты, содержащей континенты, океаны, моря, которые прогреваются по-разному. Рассмотрим некоторое поле давления с минимумом и максимумом (рис. 14.1). Поле давления размечено системой изолиний. Давление нарастает по изолиниям слева

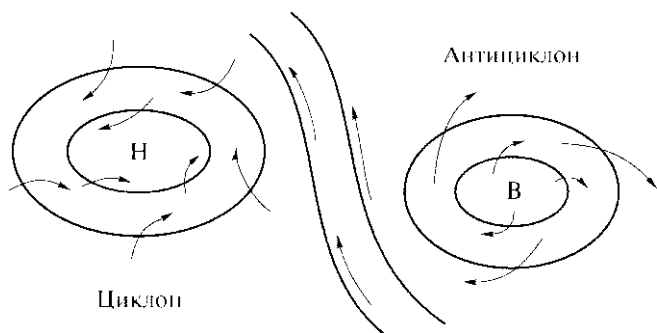


Рис. 14.1. Схема формирования геострофического ветра

направо. Здесь приведена качественная картина, без указания числовых значений давления, только с обозначением областей низкого (Н) и высокого (В) давлений. Под действием градиентов давления воздушный поток втекает в область низкого давления, с поворотом направо (в Северном полушарии) каждой втекающей частицы. Из области высокого давления воздушный поток вытекает также с поворотом направо. Вследствие такого движения образуются вращающиеся вокруг областей экстремумов давления потоки. Области пониженного давления с вращением против часовой стрелки (в Северном полушарии) называются циклонами, области повышенного давления с вращением по часовой стрелке — антициклонами. Нетрудно понять, что между

минимумом и максимумом давления будет наблюдаться перпендикулярный градиенту давления поток. Такое движение воздушных масс называется геострофическим ветром. Иными словами, геострофический ветер — это квазиравномерное движение воздушных масс под действием кориолисовых сил по изобарам перпендикулярно градиенту давления. Геострофическое приближение подразумевает равновесие между кориолисовой силой и градиентом давления, что часто хорошо выполняется на практике. В ряде случаев нужно учитывать движение воздуха и вдоль градиента давления, но при этом остается и геострофическая составляющая воздушного потока. Крупномасштабные течения общей циркуляции в атмосфере являются в основном квазигеострофическими. Основные закономерности квазигеострофических движений в атмосфере были поняты давно, еще в середине XIX столетия было сформулировано (Бейс-Баллот) правило: если стоять спиной к ветру, то слева будет область низкого давления, а справа — высокого (в Северном полушарии, а в Южном — наоборот). На рис. 14.2 приведен пример космического снимка Земли в ИК диапазоне, на котором хорошо просматриваются

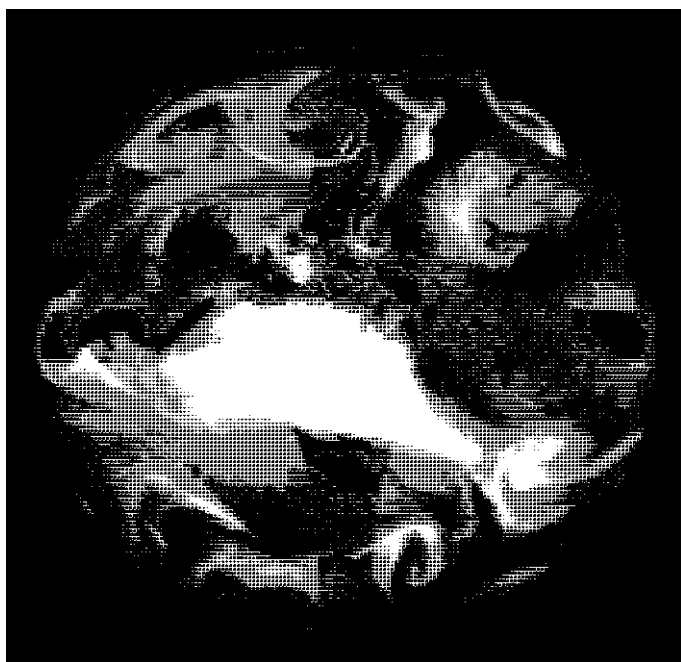


Рис. 14.2. Снимок Земли в ИК диапазоне с циклоническими спиралями

несколько циклонических спиралей с разными направлениями вращения в Северном и Южном полушариях.

Рассмотрим систему глобальной циркуляции атмосферы. Схема глобальной циркуляции была приведена в гл. 9. Сильнее всего наша планета нагревается в районе экватора, здесь больше падает и поглощается солнечной энергии на единицу площади. Там же идет сильное испарение, образование облаков и туч, большое количество осадков, и теплый воздух поднимается вверх. Таким образом, образуется глобальная ячейка циркуляции (ячейка Хэдли (Гадлея)): теплый воздух поднимается от экватора и опускается где-то в области 30-х широт. Отсюда следует, что в районе 30-х широт находится область высокого давления — область субтропических циклонов. Соответственно ветры от 30-х широт дуют по направлению к экватору, где находится область низкого давления — экваториальная ложбина и внутритропические зоны конвергенции. В районе 60-х широт также образуется область низкого давления, и между 30-ми и 60-ми широтами формируется еще одна ячейка глобальной циркуляции (ячейка Ферреля). Наконец между 60-й широтой и полюсом формируется полярная ячейка глобальной циркуляции с областью высокого давления на полюсе (полярный антициклон).

Система глобальной циркуляции атмосферы хорошо объясняется в рамках геострофического приближения (см. рис. 9.1). Ветры, которые дуют из области 30-х широт к экватору, отклоняются вправо (в Северном полушарии) и приобретают преобладающее северо-восточное направление — это так называемые северо-восточные пассаты. В Южном полушарии пассаты имеют юго-восточное направление. В целом пассаты, дующие из областей высокого давления 30-х широт к экватору, имеют общее восточное направление. Ветры, которые дуют из области высокого давления 30-х широт к области низкого давления 60-х широт, имеют общее западное направление, это так называемый западный перенос. Полярные ветры имеют восточное направление.

Отметим некоторые дополнительные особенности системы глобальной циркуляции атмосферы. Как сказано выше, в Северном полушарии между 30 и 60° преобладают западные ветры, а в Южном полушарии эти ветры заметно сильнее. Это связано с тем, что в 40-х широтах мы имеем фактически единый океан, не прерываемый континентами, только с узкой полосой суши в Южной Америке. Здесь над океаном ветры испытывают заметно меньшее торможение, разгоняются и образуют область

знаменитых «ревуших сороковых» широт, весьма опасных для мореплавателей. Кстати, и циклоны в Южной Атлантике почти не зарождаются. Есть еще любопытные исторические названия. В пору покорения Нового Света (конец XV–XVI в.) район максимума давления Северного полушария — 30-е широты получили название «конских» широт, потому, что очень часто в районе этих широт корабли попадали в штиль. А длительное стояние в штиль сокращало запасы воды и приводило к тому, что лошадей приходилось выбрасывать за борт, и их в ту пору много плавало в этих широтах.

Рассмотренная выше схема глобальной циркуляции атмосферы предполагает усреднение по достаточно большим периодам времени. Конечно, ежечасные и ежедневные реальные карты ветров заметно отличаются от схемы глобальной циркуляции в силу многих других локальных и региональных факторов.

Уравнения движения. Локальные эффекты

Рассмотрим далее основные закономерности динамики атмосферы на основе уравнения движения для частицы воздуха. Как обычно, выбираем достаточно малую частицу по сравнению с внешними масштабами задачи, но достаточно большую по сравнению с размерами молекул, чтобы ее можно было считать частицей сплошной среды. В названных пределах выбор объема при разбиении сплошной среды на частицы не должен играть роли, поэтому уравнение движения целесообразно нормировать на объем элементарной частицы и перейти к распределениям объемной плотности сил и плотности ускорения среды. Тогда уравнение движения будет иметь вид

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \equiv \rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \Delta \mathbf{V} - 2\rho [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}]. \quad (14.1)$$

Здесь слева плотность частицы ρ , умноженная на ее ускорение. Справа — несколько слагаемых, характеризующих объемную плотность массовых сил: объемные плотности сил тяжести $\rho \mathbf{g}$, кориолисовых сил $-2\rho [\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}]$, сил трения $\mu \Delta \mathbf{V}$ и градиент давления ∇P . Плотность сил трения определяется лапласианом скорости и коэффициентом μ , характеризующим вязкость воздуха. Уравнение (14.1), называемое уравнением Навье–Стокса, описывает течение вязкой сжимаемой жидкости или газа. В целом, для описания движения сплошной среды кроме уравнения (14.1), характеризующего изменение плотности импульса вязкой жидкости, требуется уравнение непрерывности, а также уравнение

состояния сплошной среды и уравнения изменения энергии и энтропии вязкой жидкости. Строго говоря, уравнение Навье–Стокса, описывающее движение сплошной среды, — это уравнение в частных производных, и полную производную по времени следует выражать через соответствующие частные производные, что приводит к нелинейности уравнения по скорости. Иногда удобно проформировать уравнение Навье–Стокса на плотность и переписать в следующей форме, где фигурируют соответствующие ускорения и кинематический коэффициент вязкости $\eta = \frac{\mu}{\rho}$:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \mathbf{g} + \eta\Delta\mathbf{V} - 2[\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}]. \quad (14.2)$$

Решение полной системы названных уравнений движения сплошной среды представляет собой весьма сложную задачу. Для иллюстрации мы рассмотрим лишь два частных случая решения уравнения Навье–Стокса применительно к динамике атмосферы.

Вначале рассмотрим вертикальные составляющие уравнения Навье–Стокса. Основными слагаемыми в правой части (14.1) являются объемная плотность силы тяжести и соответствующая вертикальная компонента градиента давления. Вертикальной составляющей кориолисова ускорения в (14.2) при обычных скоростях движения до сотни метров в секунду можно пренебречь ($< 10^{-3}$) по сравнению с $\mathbf{g}$. Если предположить малость вертикальных ускорений и пренебречь силами трения, получим уравнение гидростатики:

$$\nabla P = \rho \mathbf{g}.$$

Добавляя сюда уравнение состояния идеального газа и предположение об изотермичности, получим барометрическую формулу, как это уже было сделано в предыдущем разделе.

Теперь рассмотрим уравнения (14.1), (14.2) в некоторой горизонтальной плоскости. Если движения считать очень медленными, пренебречь ускорением и силой трения, то останутся следующие слагаемые: горизонтальный градиент давления и кориолисова сила. Отсюда получится уравнение геострофического ветра:

$$\nabla P = -2\rho[\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V}],$$

из которого видно, что скорость не направлена по градиенту давления. Она направлена перпендикулярно к градиенту давления, поскольку они связаны через векторное произведение. Отметим,

что крупномасштабные процессы в атмосфере квазидвумерны и квазигеострофичны.

Подобные крупномасштабные движения воздушных масс хорошо видны на космических снимках. В область циклона с пониженным давлением стягиваются воздушные массы, поэтому спиралевидные облачные структуры с закручиванием против часовой стрелки являются естественными трассерами циклонов. Из области антициклона с повышенным давлением наблюдается также движение воздушных масс, но с вращением уже по часовой стрелке. Кстати, типичная энергия циклонов (не тропических) — это 10^{17} Дж. Для сравнения энергия мегатонной атомной бомбы $4 \cdot 10^{15}$ Дж, т.е. циклон эквивалентен десяткам и сотням мегатонных бомб. Однако эта энергия распределена по большому пространству и вызывает лишь сравнительно медленное движение воздушных масс.

В особую группу выделяют сильные тропические циклоны, энергия которых достигает 10^{19} Дж. Мощные тропические циклоны традиционно именуют ураганами (английское название — hurricane) в Атлантике и тайфунами на Тихом океане. Скорость ветра в ураганах и тайфунах достигает 20–40 м/с и более, что приводит к существенным разрушениям, наводнениям, цунами и другим стихийным бедствиям. Нашествиям тропических циклонов подвержены в основном Атлантическое побережье США, Карибский регион, Юго-Восточная Азия, Индонезия, Австралия. Достаточно редко тайфуны заходят к нам, на дальневосточное побережье России. Поскольку мощные тропические циклоны представляют большую опасность, существуют различные службы наблюдения за ними, которые классифицируют их (ураганам и тайфунам присваиваются имена), определяют и прогнозируют траектории их движения. Космический снимок тропического циклона приведен на рис. 14.3.

Наряду с глобальной циркуляцией атмосферы существуют движения воздуха, связанные с локальными пространственными и временными факторами. Природа локальных ветров также имеет простое физическое объяснение. Первый пример таких локальных ветров и перемещений воздушных масс — это так называемые морской и береговой бризы (рис. 14.4, а). Когда наступает день и ярко светит солнце, суша практически сразу прогревается, значительно быстрее воды. Причина в том, что теплоемкость воды гораздо больше, чем теплоемкость существующих грунтов, кроме того, вода прогревается на значительную глубину, поэтому



Рис. 14.3. Космический снимок тропического циклона

представляет собой более емкий резервуар тепла, чем практически не пропускающий оптическое и ИК излучение грунт. Воздух над сушей также прогревается быстрее. Далее прогревающийся воздух расширяется, плотность его понижается и нагретый воздух поднимается вверх. В результате над сушей образуется область низкого давления, в отличие от области более высокого давления над морем. Естественно, из области высокого давления в область низкого давления подтягивается прохладный воздух с моря — морской бриз. Циркуляция замыкается, и получается некоторый локальный круговорот вокруг берега. Здесь предполагается, что берег не содержит высоких гор, следовательно отсутствует заметный адиабатический подъем или опускание воздуха. Ночью имеет место противоположная ситуация. Суша быстро остывает, а вода отдает тепло значительно медленнее, поэтому ночью наоборот дует береговой бриз с суши на море. Такого рода ветры имеют естественную суточную периодичность.

Примером ветров, связанных с сезонной периодичностью нагрева, являются муссоны. Сравнительно устойчивая муссонная циркуляция наблюдается в Экваториальной Африке, на восточной и южной периферии Азии. Достаточно сильно это явление проявляется на полуострове Индостан (рис. 14.4, б). Летом хорошо прогревается сам полуостров и воздушные массы над

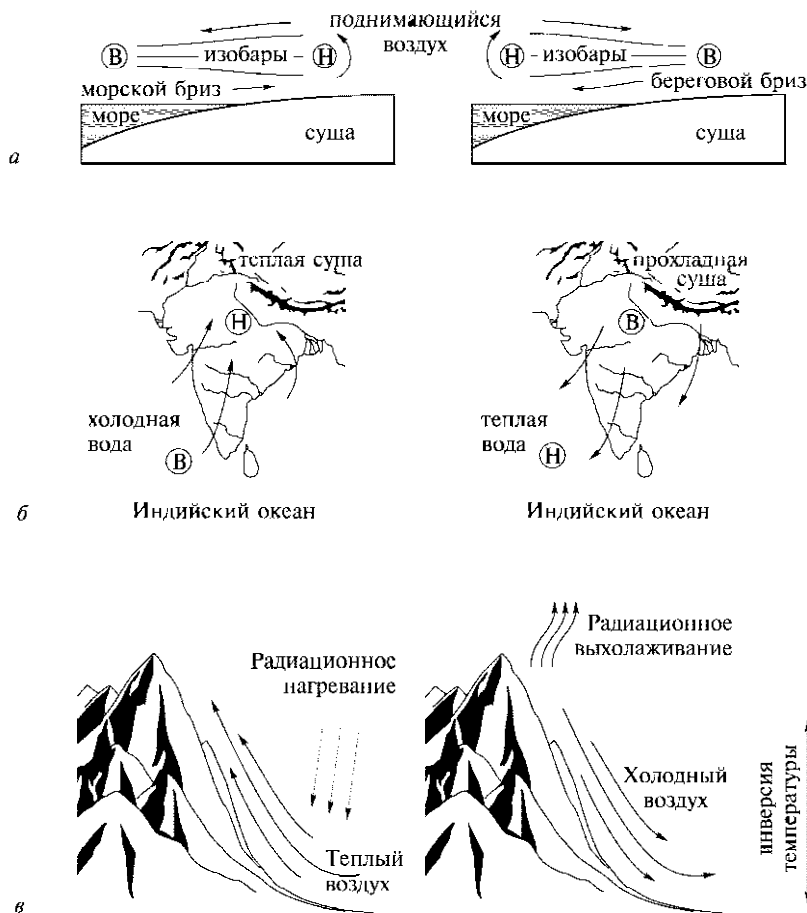


Рис. 14.4. Схемы локальных ветров: а) морской и береговой бризы; б) муссоны; в) горно-долинные ветры

ним, образуется область низкого давления, и ветер дует с моря. Естественно, это очень влажный ветер, который вызывает сезон дождей. В зимние месяцы суша охлаждается быстрее окружающего океана. Поскольку океан и воздушные массы над ним теплее, здесь образуется область низкого давления, и зимой сухие ветры дуют с континента на море. Отметим, что такое поведение давления над материками типично для внетропических широт: летом давление понижено, а зимой повышено.

Рассмотрим так называемые горно-долинные ветры (рис. 14.4, в). Здесь ситуация отличается от предыдущих примеров тем, что происходят неадиабатические процессы. Выше был рассмотрен фён, когда воздушные массы адиабатически поднимаются в гору, охлаждаются и с осадками теряют запас влаги, а при спуске с горы происходит адиабатический нагрев воздуха. В случае достаточно больших вершин и протяженных склонов гор происходит длительный подъем воздуха, который может прогреваться на склоне. Такой подъем с внешним нагревом будет, конечно, неадиабатическим. Тогда при прогреве воздуха на склоне долинный ветер, дующий из долины на гору, становится теплым. И наоборот, горный ветер достаточно долго втекает по склону гор в долину, и существуют условия для его радиационного охлаждения (ясное небо), — он теряет энергию на ИК излучение и заметно охлаждается.

Подобные холодные ветры с гор имеют различные местные названия. Такое явление наблюдается на Черноморском побережье в Крыму и в районе Новороссийска и называется бора. Подобный ветер на средиземноморском побережье имеет название мистраль.

В целом динамика атмосферы определяется как процессами глобальной циркуляции, так и локальными явлениями типа рассмотренных выше бризов, муссонов, горно-долинных ветров и т. д.

Погода и климат

Термины «погода» и «климат» весьма часто употребляются и хорошо всем известны. Под погодой понимается физическое состояние атмосферы у поверхности Земли в данный момент времени. Физическое состояние атмосферы характеризуется метеорологическими величинами (температура, давление, влажность, ветер, облачность, осадки) и атмосферными явлениями (гроза, туман, пыльная буря, метель и т. п.). Понятие климата связано с режимом температуры и осадков (совокупности атмосферных условий) на данной территории за длительный период времени. Можно сказать, что климат — это «синтез погод». Однако нет общепринятого определения масштаба времени, разделяющего синоптические процессы, формирующие погоду, и процессы формирования климата, поэтому при обсуждении проблем изменений климата следует уточнять о каком масштабе времени (и каких атмосферных условиях) идет речь. Проблемы различий и изменений климата привлекали к себе внимание с незапамятных времен. Еще древним грекам было понятно, что климат в

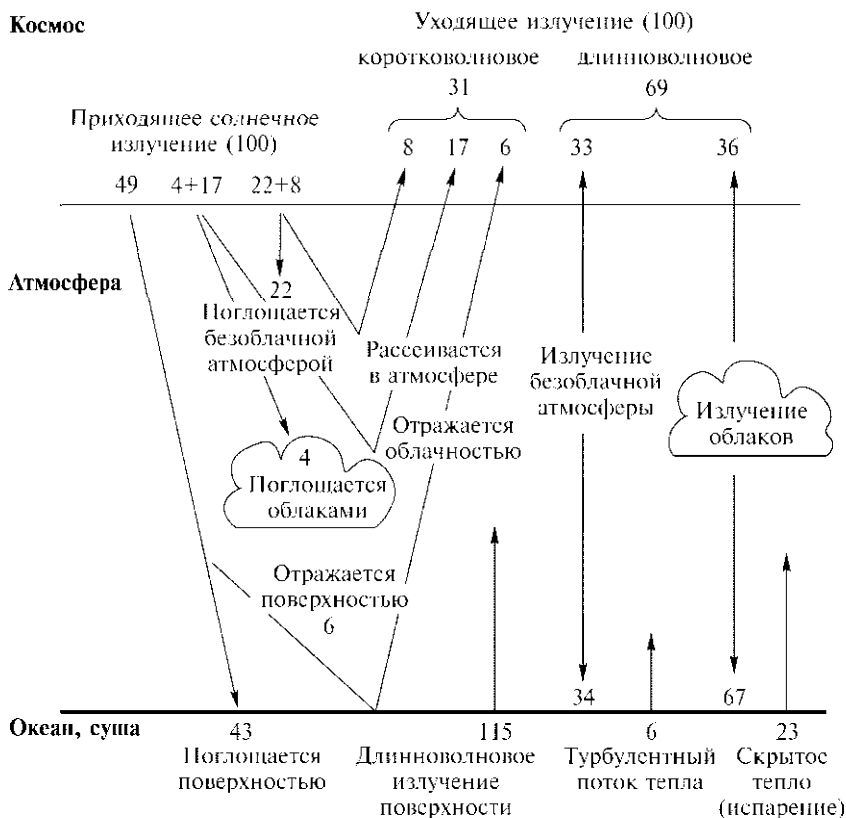


Рис. 14.5. Радиационно-тепловой баланс атмосферы

основном определяется средней высотой Солнца (широтой местности), наклоном солнечных лучей. Само слово «климат» имеет греческое происхождение и означает «наклон».

Процессы, определяющие погоду и климат, обусловлены как внутренними факторами и динамикой системы геосфер Земли, так и внешними факторами, прежде всего Солнцем. Прежде чем обсуждать проблемы погоды и климата, рассмотрим превращения солнечной энергии в атмосфере. На рис. 14.5 приведен усредненный радиационно-тепловой баланс в атмосфере, полученный по данным многочисленных измерений [8, 166]. Конечно, относительная величина всех составляющих баланса энергии сильно меняется в зависимости от времени, погодных условий и местности, однако анализ усредненных величин представляет существенный

интерес для физики атмосферы. Отметим, что цифры, определяющие баланс энергии и представленные на рис. 14.5, могут отличаться в различных источниках на 10–20%, что отражает несовершенство современных знаний об энергетическом режиме Земли.

На рис. 14.5 условно изображены два сорта излучения, одно — приходящее от Солнца, с максимумом по интенсивности в оптическом диапазоне, другое — уходящее от Земли. Уходящее излучение содержит как коротковолновое излучение, рассеянное и отраженное атмосферой и поверхностью Земли, так и длинноволновое, связанное с излучением самой планеты. Максимум этого длинноволнового излучения, как отмечалось в гл. 12, лежит в инфракрасной области спектра с длиной волны $\lambda_m \approx 10$ мкм. Если взять за 100% излучение, которое приходит от Солнца, то примерно 31% от него отражается и рассеивается атмосферой сразу: 17% облаками, 6% поверхностью земли и 8% безоблачной атмосферой. Назад уходит примерно 31%, а 69% этого коротковолнового излучения поглощается атмосферой (4% поглощается облаками, а 22% — безоблачной атмосферой) и 43% Землей. В установившемся стационарном режиме атмосфера излучает во внешнее пространство те же 69% низкочастотного ИК излучения. Причем атмосфера излучает низкочастотное ИК излучение и вниз, в Землю ($67 + 34 = 101\%$), а Земля излучает в атмосферу 115% ИК излучения + 29% энергии скрытым теплом и турбулентными потоками, что составляет 144% по энергии от падающего излучения. Хотя поток энергии от поверхности Земли превышает 100%, никакого противоречия с законом сохранения энергии здесь нет, поскольку Земля получает 43% по энергии высокочастотным излучением и 101% ($67 + 34 = 101\%$) низкочастотным ИК излучением от атмосферы, что составляет те же 144%. Таким образом, между поверхностью Земли и атмосферой благодаря парниковому эффекту возникают встречные потоки энергии, которые дополнительно нагревают атмосферу и поверхность Земли.

Если приравнять излучаемую Землей энергию равновесному излучению некоторого эквивалентного черного тела, то получим аналогичную (12.3) оценку температуры с дополнительным множителем $1,44^{1/4} \approx 1,1$, т. е. температура этого тела будет составлять $T \approx 280$ К. Согласно тем же экспериментальным данным атмосфера излучает в ИК диапазоне 170% (67% — безоблачная атмосфера и 103% — облака) энергии от первичного солнечного излучения. Если сопоставить излучаемую атмосферой энергию

равновесному излучению некоторого эквивалентного черного тела, то аналогично для оценки температуры получим соотношение вида (12.3) с дополнительным множителем $1,7^{1/4} \approx 1,14$, что соответствует $T \approx 290$ К. Конечно, атмосфера и поверхность Земли заметно отражают падающее на них излучение, т. е. являются не абсолютно черными, а «серыми» телами, однако при сопоставлении с излучением некоторого эквивалентного черного тела это учитывается соответствующим коэффициентом серости. Полученные оценки довольно близки к реальным средним температурам атмосферы и поверхности Земли. Для более точного анализа необходим учет многих факторов, в частности, неравновесности излучения Земли и атмосферы, процессов переноса излучения, тепла, импульса и т. д.

Проблемы анализа динамики атмосферы и океана, предсказания погоды и климата представляют собой сложный комплекс физических и математических задач. Ранее прогнозы погоды основывались, как правило, на экстраполяции уже зарегистрированных данных. Метеорологи анализировали карты погоды, эволюцию областей высокого и низкого давления, движение и развитие фронтов, распространение облачности и другие подобные факторы и на этой основе давали прогноз. Искусство прогнозирования погоды состоит в учете многих факторов и возможности предвидения изменения состояния атмосферы. В истории метеорологии известно немало лиц, обладавших уникальными способностями в прогнозировании погоды. На основе накопленного опыта они могли определять, как будет в последующие дни меняться давление, положение фронтов и температура. Однако опыт выдающихся прогнозистов практически не передается последующим поколениям метеорологов [11].

В противоположность этому искусству метеорологов прошлого современная наука прогнозирования основывается на использовании математических моделей атмосферы и океана, поэтому используемые метеорологами современные методы называются численными методами прогноза погоды. Реализация подобных численных методов прогноза погоды стала возможной с 50-х годов XX в., когда появились соответствующие электронно-вычислительные машины. Прогноз состояния атмосферы в данном месте на срок до трех суток осуществляется путем интегрирования уравнений движения и переноса в атмосфере. В таком временном интервале атмосферные процессы можно считать адиабатическими, т. е. пренебрегать притоком энергии извне и диссипацией энергии за счет вязкости. По известному начальному состоянию

атмосферы рассчитываются временные и пространственные изменения. Поэтому для точного прогноза погоды необходима детальная и точная информация о начальном состоянии атмосферы. Требуемые исходные данные предоставляет, главным образом, мировая сеть метеостанций и сеть станций радиозондирования атмосферы. Высотные радиозонды, запускаемые на воздушных шарах на высоты до 35 км измеряют температуру, давление, влажность воздуха и передают эту информацию по радио, кроме того, с Земли определяется и скорость ветра по положению радиозонда в пространстве. Станции радиозондирования расположены в основном в экономически развитых странах и отстоят друг от друга на расстояния порядка сотен километров. С начала 60-х годов регулярно запускаются метеорологические спутники, которые регистрируют распределения метеорологических параметров, осуществляют съемки распределений облаков, циклонических систем и т. п. Особо ценны спутниковые данные над океанами, где сеть метеорологических пунктов и станций радиозондирования весьма разрежена. В соответствии с разработанными Всемирной метеорологической организацией международным соглашением метеорологические данные со всего мира передаются в мировые центры данных в Москве, Вашингтоне и Мельбурне, а также во все национальные метеорологические учреждения.

Отметим, что ошибки, которые неизбежно вносятся в математическую модель, главным образом из-за несточности измерений, в процессе расчета имеют тенденцию к росту. Поэтому при расчете параметров состояния атмосферы на неделю или более ошибки, как правило, становятся столь большими, что исчезает возможность прогноза. Для предсказания на длительные сроки температуры, усредненной по времени и пространству, детерминированное описание не дает хороших результатов, и в этих случаях используются статистические методы прогноза, основанные на представлении о линейной регрессии. На возможность того, что малые возмущения начального состояния атмосферы могут привести со временем к существенным изменениям конечного состояния атмосферы и создать проблему предсказуемости, указывал А. Н. Колмогоров более 40 лет назад в следующей образной форме: «Представим себе две одинаковые планеты с совершенно идентичными состояниями атмосферы. Если на одной из них выйти на крыльцо и махнуть платком, а на другой этого не сделать, то через какое-то время погода на этих планетах станет совершенно различной» [87].

В определенном смысле, еще более сложной проблемой является проблема анализа и предсказания климатических изменений. Если в случае предсказания погоды существует возможность постоянного сравнения «теории» (результатов численных расчетов) с «практикой» и последующей корректировки методов прогноза, то для предполагаемых климатических изменений на протяжении десятков, сотен и более лет такая возможность существенно ограничена. Земная климатическая система включает в себя все основные геосферы: атмосферу, гидросферу, литосферу, криосферу и биосферу. Следует отметить сложность структуры и взаимосвязей в земной климатической системе, ее неоднородность, нелинейность и нестационарность. Поэтому особую роль в анализе земной климатической системы играют математические модели, которые интенсивно развиваются в последние годы. Разработка климатических моделей важна для прогноза климата и выбора стратегии развития человечества [166]. Ниже в гл. 20 рассмотрена проблема глобального потепления климата, которая анализируется исследовательскими организациями и правительствами многих стран. В настоящее время существует большое число климатических моделей, многие метеорологические центры имеют собственные модели. Большую роль в развитии климатического моделирования сыграли модели лаборатории геофизической гидродинамики Принстонского университета. Широко известны климатические модели институтов Академии наук СССР и России: Института прикладной математики, Института океанологии, Института физики атмосферы [80, 4, 88, 174].

Глава 15

Верхняя атмосфера, ионосфера и ближний космос

Верхняя атмосфера

Обычно термин «верхняя атмосфера» используют для названия части атмосферы, расположенной выше мезопаузы или турбопаузы (80–110 км), т. е. выше тропосферы, стратосферы и мезосферы. Верхняя атмосфера характеризуется сравнительно быстрым изменением относительного содержания газов с высотой. Плотность различных газов уменьшается с высотой по различным «барометрическим формулам», т. е. чем тяжелее газ, тем быстрее спадает с высотой его плотность. Типичные зависимости плотности различных газов от высоты были приведены на рис. 12.2. Область атмосферы, включающую стратосферу и мезосферу, часто называют «средней атмосферой». Иногда термин «верхняя атмосфера» понимается в более широком смысле, как область атмосферы выше тропопаузы, т. е. в верхнюю атмосферу включают стратосферу и мезосферу. Структура и динамика верхней атмосферы определяются главным образом процессами ионизации и диссоциации молекул и атомов солнечным излучением, химическими процессами, возбуждением молекул и атомов, их соударениями, дезактивацией и т. д. Отсюда ясно, что состояние верхней атмосферы существенно зависит от солнечной активности. Изучением явлений, происходящих в верхней атмосфере, с точки зрения атомно-молекулярных взаимодействий и влияния на них солнечного излучения занимается аэронаука.

Нестационарные потоки различных видов энергии определяют изменение состояния верхней атмосферы. Наиболее существенным из них является сосредоточенный в области длин волн λ короче 300 нм поток УФ и рентгеновского излучений, который составляет около 1% полного солнечного потока. Большая часть этого излучения с $\lambda = 240\text{--}300$ нм проникает до высот 20–40 км, где вызывает диссоциацию озона и появление так называемого озонового слоя. Основная часть излучения с

длинами $\lambda = 200\text{--}240$ нм и $\lambda = 140\text{--}170$ нм поглощается на высотах 80–100 км, вызывая диссоциацию молекулярного кислорода. Излучение с λ короче 130 нм (жесткое УФ и рентгеновское излучения) производит возбуждение, диссоциацию и ионизацию молекул и атомов верхней атмосферы и ее разогрев на высотах более 100 км. Поток ионизирующего электромагнитного излучения, который образуется в короне и хромосфере Солнца, на границе земной атмосферы варьируется в пределах $(0,3\text{--}1) \cdot 10^{-2}$ Вт/м², что составляет $(0,3\text{--}1) \cdot 10^{-5}$ от полного потока излучения Солнца. Вариации потока этого ионизирующего излучения при различных фазах солнечной активности определяют влияние процесса солнечной активности на верхнюю атмосферу. На рис. 12.4 были схематично показаны изменения УФ и рентгеновского излучений при различной активности и вспышках на Солнце. Интенсивность потока излучения может меняться в течение солнечного цикла в 3 раза, а в период солнечных вспышек кратковременно может возрастать в несколько раз [57].

Существенное влияние на верхнюю атмосферу оказывает солнечный ветер — непрерывный поток плазмы солнечного происхождения, распространяющийся приблизительно радиально от Солнца. Солнечный ветер образуется при газодинамическом расширении солнечной короны в межпланетное пространство. При высоких температурах ($\approx 1,5 \cdot 10^6$ К) солнечной короны давление вышележащих слоев не уравнивает газовое давление вещества короны, и корона расширяется. Такое расширение короны приводит к разгону коронального вещества до сверхзвуковых скоростей. Типичные скорости потоков солнечного ветра лежат в пределах 300–700 км/с. Механизмы преобразования энергии солнечного ветра в энергию верхней атмосферы достаточно сложны и охватывают цепь взаимодействий: солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера — верхняя атмосфера. Неоднородности плазмы солнечного ветра вызывают различные возмущения и процессы в ионосфере и верхней атмосфере: магнитные бури, полярные сияния, нарушения ионосферной радиосвязи и др.

Из Космоса приходят в верхнюю атмосферу также микрометеоры и корпускулярные потоки космических лучей, приносящие энергию и приводящие к химическим превращениям. Солнечные космические лучи — потоки заряженных частиц, ускоряемых до высоких энергий в верхней части атмосферы Солнца во время солнечных вспышек. Солнечные космические лучи эпизодически регистрируются в виде внезапных резких повышений интенсивности космических лучей после некоторых солнечных вспышек

на фоне галактических космических лучей. Полученный из наблюдений верхний предел энергий частиц солнечных космических лучей $\varepsilon = 2 \cdot 10^{10}$ эВ. Нижняя граница энергий частиц неопределенна, она может опускаться до $\varepsilon = 10^5$ эВ, т.е. смыкаться с верхней границей энергий частиц солнечного ветра. В состав солнечных космических лучей входят протоны, электроны и реже более тяжелые ядра. Относительное содержание ядер в области энергий $\varepsilon = (1-3) \cdot 10^7$ эВ совпадает с их распространенностью в солнечной короне. В области меньших энергий потоки солнечных космических лучей часто обогащены тяжелыми ядрами. Поток галактических космических лучей состоит из частиц более высоких энергий (до $\varepsilon = 10^{21}$ эВ) по сравнению с солнечными космическими лучами. В интервале наблюдаемых энергий спектр солнечных космических лучей спадающий, с быстрым уменьшением числа частиц в области больших энергий.

Со стороны Земли на верхнюю атмосферу воздействуют распространяющиеся из тропосферы акустические и гравитационные волны. В верхней атмосфере поглощается также энергия приливов, которые возбуждаются в озоновом слое на высотах 30–70 км солнечным УФ излучением ($\lambda > 200$ нм). Снизу поступают в верхнюю атмосферу и потоки электромагнитного излучения в видимой и ИК областях, представляющие собой преобразованные нижней атмосферой и поверхностью Земли потоки солнечного излучения (рис. 14.5).

В верхней атмосфере существуют активные зоны, где происходит интенсивное превращение одних видов энергии в другие. В частности, можно выделить зоны полярных сияний и радиационные пояса, в которые в периоды магнитных бурь выпадают потоки заряженных частиц. Отметим, что верхняя атмосфера является термодинамически неравновесной средой. Степень неравновесности возрастает с высотой с убыванием плотности. Однако вплоть до высот 500–1000 км и выше степень неравновесности многих характеристик верхней атмосферы остается достаточно малой, что позволяет использовать классическую гидродинамику и магнитную гидродинамику с учетом химических реакций для описания верхней атмосферы.

Типичные зависимости температуры атмосферы от высоты приводились на рис. 12.1. На характерных особенностях подобных зависимостей и основана классификация слоев атмосферы. Положение внешней границы верхней атмосферы зависит от множества факторов. Для пейтральной атмосферы положение внешней границы верхней атмосферы является условной. На высоте нескольких тысяч км преобладающая компонента верхней

атмосферы — атомарный водород. При температуре экзосферы 1500 К концентрация атомов водорода 10^3 см^{-3} (условная граница) должна наблюдаться на высоте 1500 км. Протяженность верхней атмосферы для ионизированной компоненты до 10 радиусов Земли в направлении на Солнце и еще большая в антисолнечном направлении.

В верхней атмосфере наблюдаются сильные суточные вариации температуры. Амплитуды суточных вариаций и среднесуточные значения температуры растут с высотой, выходя на постоянные значения выше 300 км. В термосфере высоких широт наблюдаются сильные токи, обусловленные возникающими в магнитосфере и переносимыми в ионосферу электрическими полями. Джоулев нагрев этими токами и выделение тепла при выпадении энергичных частиц оказывают заметное влияние на глобальное распределение температуры. Влияние джоулева нагрева возрастает в период магнитных бурь. Перераспределение температур вызывает при этом резкие перестройки термосферной циркуляции и скорости ветра, достигающие 500–600 м/с на высотах более 120 км.

Верхняя атмосфера находится в непрерывном движении. В частности, к основным типам движений относятся: среднесуточная циркуляция; термические гравитационные приливы с суточными и полусуточными периодами; акустические и внутренние гравитационные волны; турбулентные движения. Ниже 80 км в зимнем полушарии преобладает западный среднесуточный ветер с максимумом в средних широтах на высоте 60 км, достигающий значения 80 м/с; в летнем полушарии преобладает восточный с максимумом в средних широтах на высоте 70 км, достигающий 60 м/с. Выше 200 км среднесуточный ветер имеет такой же сезонный ход, но его величины в спокойных геомагнитных условиях, как правило, меньше. Начиная с высот около 100 км выше существует слой обратной циркуляции: восточной зимой и западной летом. Выше 140–160 км образуются глобальные ячейки циркуляции, различные в солнцестояние и равноденствие. В зимнем полушарии обратная ячейка обусловлена действием высокоширотного источника нагревания. Метеорная зона на высотах 75–105 км с центром на 95 км находится как раз на границе слоев с разной циркуляцией. Дрейфы метеорных следов показывают здесь полугодовой сезонный ход: в течение года — западный ветер, но в период равноденствий наблюдается резкое ослабление западного ветра или обращение ветра на восточный. В меридиональном разрезе верхней атмосферы существует только по одной

ячейке глобальной циркуляции в каждом полушарии в отличие от трех в тропосфере (рис. 9.1).

Гравитационные волны с периодами от десятка минут до нескольких часов, обнаруживаемые на высотах мезосферы и выше, в основном генерируются тропосферными источниками (атмосферные фронты, тайфуны, струйные течения) и колебаниями земной поверхности. Зимой наблюдаются распространяющиеся от неоднородностей земной поверхности до высот порядка 80 км стоячие планетарные волны с масштабом в полушарие.

Суточная смена нагрева и охлаждения приводит к расширению и сжатию верхней атмосферы с суточным периодом, возбуждая приливные волны, которые вызывают движения среды в горизонтальном направлении со скоростями от 10–30 м/с на высоте 95 км до 100–150 м/с на высотах более 200 км. При суточных вариациях воздух растекается от подсолнечной точки и устремляется через полюсы к антиподсолнечной. В области высот 100–200 км преобладает полусуточная мода приливного ветра, обязанная своим происхождением распространению термического прилива из стратосферы и мезосферы, вызванного поглощением озоном УФ излучения Солнца. Особую роль в динамике термосферы играют столкновения нейтральных частиц с ионами, движение которых поперек магнитных силовых линий геомагнитного поля затруднено. Трение нейтральных частиц с ионами, «привязанными» к магнитным силовым линиям, определяет одну из главных гидродинамических сил верхней атмосферы — ионное трение.

Воздействие солнечного и корпускулярных излучений на верхнюю атмосферу приводит к ионизации и свечению верхней атмосферы. Свечение на высотах около 100 км подразделяют на ночное, сумеречное и дневное. Свечение атмосферы ночью связано с образованием возбужденных атомов и молекул в результате химических реакций. Обычно возбужденные частицы образуются в результате процессов ионизации, диссоциации, в ионно-молекулярных реакциях и при столкновениях с другими возбужденными частицами. Свечение состоит из непрерывного спектра и линий (эмиссий) атомов и молекул и наблюдается от ИК до УФ области спектра. Большинство эмиссий образуется на высотах около 100 км и наблюдается с космических кораблей как единый светящийся слой. На низких широтах и высотах около 250 км наблюдается также свечение более слабого второго слоя. Для ночного свечения наиболее интенсивны в видимой области спектра линии атомарного кислорода (красные — 630–636,4 нм и зеленая — 557,7 нм), а также D-линия

натрия (589,3 нм). В ближней ИК области спектра достаточно интенсивна группа вращательно-колебательных полос гидроксила. В дневное и сумеречное время свечение обусловлено также и флуоресценцией под действием солнечного излучения.

Ионосфера

Часть атмосферы, где велика концентрация ионов и электронов и существенно возрастает проводимость, называется ионосферой. По мере открытия слоев (областей) ионосферы их обозначали различными большими буквами латинского алфавита. Таких областей в ионосфере несколько, и они не имеют четко выраженных границ. Верхний слой F' соответствует главному максимуму ионизации, который поднимается до высот 300–400 км ночью, а днем (преимущественно летом) раздваивается на слои F_1 и F_2 с максимумами на высотах 160–200 км и 220–320 км. На высотах 90–150 км находится область E , а ниже 90 км — область D . Выше области F электронная концентрация постепенно уменьшается до высот 15–20 тыс. км (так называемая плазменная пауза), а выше уменьшается более резко и переходит к низким электронным концентрациям межпланетной среды. Типичные зависимости электронной концентрации от высоты в логарифмическом масштабе схематично изображены на рис. 15.1. Отметим, что величина электронной концентрации существенно меняется в зависимости от времени суток, сезона, солнечной активности, геомагнитных возмущений, солнечного ветра и других факторов. Например, максимальная концентрация в максимуме F слоя может варьироваться в пределах двух порядков. Наблюдаемая электронная концентрация практически совпадает с концентрацией ионов, так как среда остается в целом электронейтральной. Масштаб разделения зарядов в ионосфере (дебаевский радиус) варьируется в пределах от миллиметров до сантиметров. Температура ионной T_i и электронной T_e подсистем в ионосфере различаются. Установлено, что T_e и T_i достаточно быстро растут до области F , выше рост T_i замедляется.

Существуют спокойные и возмущенные состояния ионосферы. Структура спокойной ионосферы регулярно изменяется в течение дня, сезона и 11-летнего солнечного цикла. От минимума к максимуму солнечного цикла возрастает электронная концентрация, растут температура и высота ионосферных слоев. Характеристики ионосферы заметно изменяются с широтой. Принято выделять среднениротную, экваториальную, авроральную и полярную ионосферы.

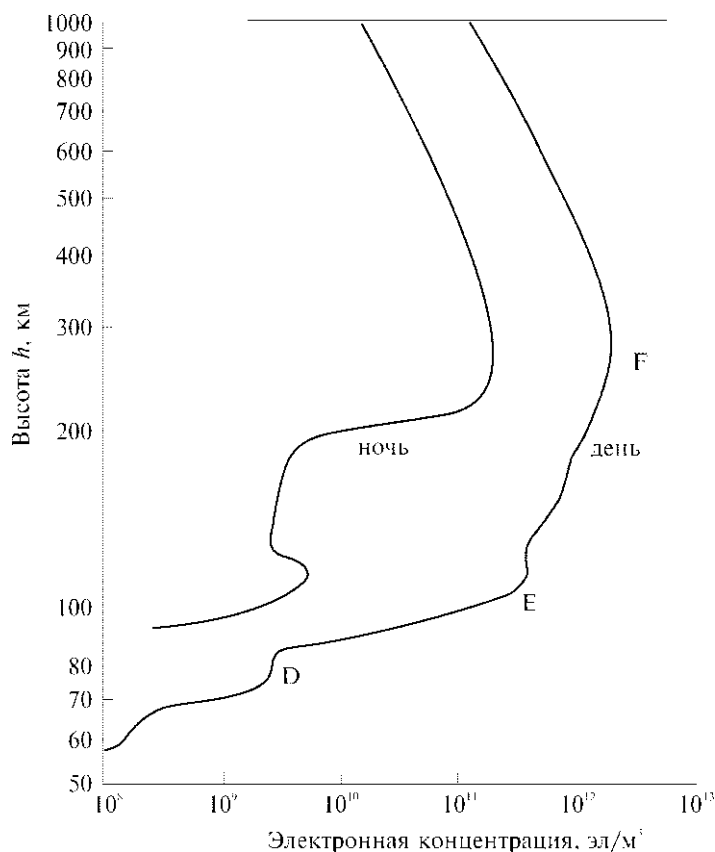


Рис. 15.1. Типичные высотные зависимости электронной концентрации в ионосфере

Существующие в ионосфере ионы и электроны образуются двумя конкурирующими процессами ионизации и рекомбинации, источники которых различаются в разных областях ионосферы. Главным источником ионизации дневной ионосферы является коротковолновое излучение Солнца ($\lambda \leq 103,8$ нм), однако существенны также и корпускулярные потоки галактических и солнечных космических лучей. Плотность почти всех компонент воздуха монотонно падает с высотой, в то время как интенсивность ионизирующего излучения нарастает (поток энергии уменьшается по направлению к Земле по мере проникновения в глубь атмосферы). Отсюда каждый тип ионизирующего излучения имеет максимум ионообразования в соответствующей области

высот. Коротковолновое излучение с $\lambda = 8,5\text{--}91,1$ нм большую часть ионов образует на высотах 120–200 км, тогда как излучение с $\lambda = (91,1\text{--}103,8$ нм вызывает максимум ионизации на высотах E -области (95–115 км), а рентгеновское излучение с λ короче 8,5 нм имеет максимум ионообразования в области D на высотах 85–100 км. Существенный вклад в ионизацию области D на высотах около 80 км вносят солнечное излучение первой линии серии Лаймана (L_α водорода с $\lambda = 121,57$ нм) и корпускулярные потоки (в частности, электроны с энергией $\leq 30\text{--}40$ кэВ). В нижней части области D (ниже 60–70 км днем и ниже 80–90 км ночью) ионизация осуществляется галактическими космическими лучами. Ниже, вблизи тропопаузы на высоте около 15 км находится еще один максимум скорости образования ионов под действием самых высокоэнергичных частиц галактических космических лучей и продуктов ядерных реакций (максимум Пфотцера). На этих высотах возникает слой ионизации с концентрацией ионов $6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Скорость ионообразования на высоких широтах больше, чем на средних и экваториальных, и возрастает при переходе от максимума к минимуму солнечного цикла в соответствии с изменением интенсивности космических лучей. К высотам 50–70 км эта величина уменьшается на 3–4 порядка, но остается выше, чем скорость ионообразования под действием других источников ионизации.

Процессом, обратным ионизации, является процесс рекомбинации. Механизмы рекомбинации изменяются с высотой. На основных высотах ионосферы происходит диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов (нейтрализация иона электроном с последующей диссоциацией молекулярного иона). На высотах ниже ~ 70 км преобладает процесс взаимной нейтрализации ионов разных знаков или ион-ионная рекомбинация, с участием стабилизирующей нейтральной частицы. Выше ~ 1000 км эффективна радиативная рекомбинация (нейтрализация атомного иона электроном с излучением фотона), где концентрация атомных ионов на 5 порядков выше концентрации молекулярных. Суммарная скорость исчезновения ионов характеризуется эффективным коэффициентом рекомбинации, который определяет величину электронной концентрации и ее динамику. Величина эффективного коэффициента рекомбинации заметно меняется в различных областях ионосферы. Наряду с процессами ионизации и рекомбинации в области F' существенны процессы амбиполярной диффузии и дрейфового переноса.

Ионный состав ионосферы отличается от первичного ионного состава, образующегося при ионизации верхней атмосферы солнечным излучением, в связи с названными физико-химическими процессами ионизации, рекомбинации и ионно-молекулярными реакциями. Данные процессы отличаются в разных областях ионосферы, что приводит к изменению ионного состава по высоте. Днем на высотах 85–200 км преобладают молекулярные ионы NO^+ и O_2^+ , в области F' (выше 200 км) — атомарный кислород O^+ , а выше (600–1000 км) — протоны H^+ . Ниже 70–80 км в основном образуются комплексные ионы-гидраты и отрицательные ионы. В нижней части области E на высотах 90–95 км часто появляется дополнительный максимум E_s , принадлежащий так называемому спорадическому E -слою. Спорадический слой образуется в основном ионами металлов Mg^+ , Fe^+ , Ca^+ (с примесью Si^+ , Na^+ , Al^+ и Ni^+), происхождение которых связывают с дроблением метеоров на этих высотах [55].

Изменение по высоте концентрации и состава нейтральных частиц верхней атмосферы определяет основные закономерности изменения параметров ионосферы: степени ионизации, ионного состава и эффективного коэффициента рекомбинации. В области D наблюдаются низкие значения электронной концентрации ($N_e < 10^3 \text{ см}^{-3}$). Высокая концентрация нейтральных атомов и молекул N_m , а следовательно, и высокая частота столкновения с ними электронов вызывает сильное поглощение радиоволн (пропорциональное произведению $N_m \nu$), что нередко прерывает коротковолновую радиосвязь. В волноводе между поверхностью Земли и D -слоем, могут распространяться длинные и сверхдлинные радиоволны. Ночью электронная концентрация в области D существенно падает и соответственно уменьшается поглощение радиоволн, поэтому раньше считали, что ночью слой D исчезает. При солнечных вспышках сильно возрастает интенсивность рентгеновского излучения, которое увеличивает ионизацию области D , что приводит к увеличению поглощения радиоволн, а иногда даже к прерыванию радиосвязи (так называемое внезапное ионосферное возмущение — эффект Делинджера). Продолжительность подобных возмущений обычно 20–90 минут. На высоких широтах иногда возникает более длительное (до нескольких дней) и значительное поглощение. Здесь повышение концентрации определяется в основном протонами солнечных космических лучей (с энергиями в несколько МэВ), которые проникают в ионосферу только в районе геомагнитных полюсов (полярных шапок), где магнитные силовые линии разомкнуты.

Область ионосферы на высотах 100–200 км, включающая слои E и F_1 , отличается регулярными изменениями. Это обусловлено тем, что именно здесь поглощается основная часть коротковолнового ионизирующего излучения Солнца. Существующая теория ионизационно-рекомбинационного равновесия довольно хорошо объясняет основные регулярные изменения N_e и ионного состава в течение дня и в зависимости от уровня солнечной активности.

Динамика главного максимума ионизации в области F_2 существенно сложнее динамики областей E и F_1 . Конечно, в среднем электронная концентрация N_e в слое F_2 в основном определяется солнечной активностью, но она сильно меняется день ото дня. Максимум суточного хода по времени нередко сильно сдвинут относительно полудня, при этом сдвиг зависит от широты, сезона и долготы. Существует сезонная аномалия, связанная с необычным увеличением электронной концентрации зимой по сравнению с летом. В экваториальной области до полудня чаще наблюдается один, а после полудня и ночью два максимума N_e , расположенных по обе стороны от магнитного экватора в геомагнитных широтах $\pm 15^\circ$ (экваториальная аномалия). После восхода Солнца максимумы (гребни экваториальной аномалии) начинают расходиться, перемещаются в более высокие широты и исчезают, в то время как на экваторе образуется новый максимум. На высоких широтах в области F_2 часто наблюдается образование широтной зоны пониженной ионизации («провала»), идущей параллельно зоне полярных сияний с повышенной ионизацией. Данные примеры показывают существенное влияние ряда геофизических факторов на ионизацию и динамику ионосферы помимо основного фактора — ионизирующего солнечного излучения. В частности, в области экваториальной аномалии существующие геомагнитное поле (почти параллельное поверхности Земли вблизи геомагнитного экватора) и восточно-западная компонента электрического поля вызывают дрейф заряженных частиц в поперечном обоим полям направлении. Такой дрейф приводит к выносу плазмы из района экватора, где максимальна ионизация, в области более низких широт. Возникает явление фонтан-эффекта, так как плазма поднимается в экваториальной области и постепенно поворачивает по направлению на север в Северном полушарии и на юг в Южном, что вызвано увеличением наклона геомагнитных силовых по обе стороны от геомагнитного экватора.

На рис. 15.2, *а* и 15.2, *б* приведены в изолиниях (в единицах 10^6 см^{-3}) примеры сечений электронной концентрации N_e в области провала и экваториальной аномалии, полученных методом радиотомографии. Сечения приведены в координатах географическая широта — высота в километрах. Спутниковая радиотомография ионосферы позволяет получать двумерные сечения концентрации ионосферной плазмы. Соответствующие радиосигналы со спутников принимаются несколькими приемниками на Земле [67]. На рис. 15.2, *а* приведено сечение ионосферы между Москвой и Мурманском, на котором хорошо просматривается ионосферный провал в районе 63° широты. На рис. 15.2, *б* показано радиотомографическое сечение области экваториальной аномалии в Юго-Восточной Азии (между Манилой и Шанхаем). Здесь на $22\text{--}26^\circ$ широтах ($12\text{--}16^\circ$ магнитных широтах) находится северный гребень экваториальной аномалии [164]. Метод спутниковой радиотомографии позволяет не только получать двумерные сечения концентрации плазмы, но и определять потоки плазмы, рассматривая последовательные во времени сечения [168]. На рис. 15.2, *в* дан пример определения потоков плазмы (произведения плотности и скорости плазмы), хорошо иллюстрирующий явление фонтан-эффекта.

Магнитосфера

Магнитосфера Земли — область околоземного космического пространства, где физические процессы управляются в основном геомагнитным полем. В первом грубом приближении это полость в потоке плазмы солнечного ветра. Внешней границей магнитосферы является магнитопауза, отделяющая геомагнитное поле от обтекающего Землю солнечного ветра. Оценка положения магнитопаузы определяется равенством динамического давления солнечного ветра и давления геомагнитного поля:

$$\frac{1}{2} N_s m_p V_s^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2,$$

где N_s и V_s — концентрация и скорость солнечного ветра, B — геомагнитное поле на магнитном экваторе, m_p — масса протона. Подставляя значения для спокойного солнечного ветра $300 < V_s < 400 \text{ км/с}$ и $4 < N_s < 6 \text{ см}^{-3}$, получаем для положения магнитопаузы $(8,8\text{--}10,4) R_\oplus$, что сопоставимо со средним экспериментальным значением $10,8 R_\oplus$ [72].

Определение нижней границы магнитосферы достаточно условно, плотность энергии геомагнитного поля превышает плотность энергии вмороженной в магнитное поле плазмы на

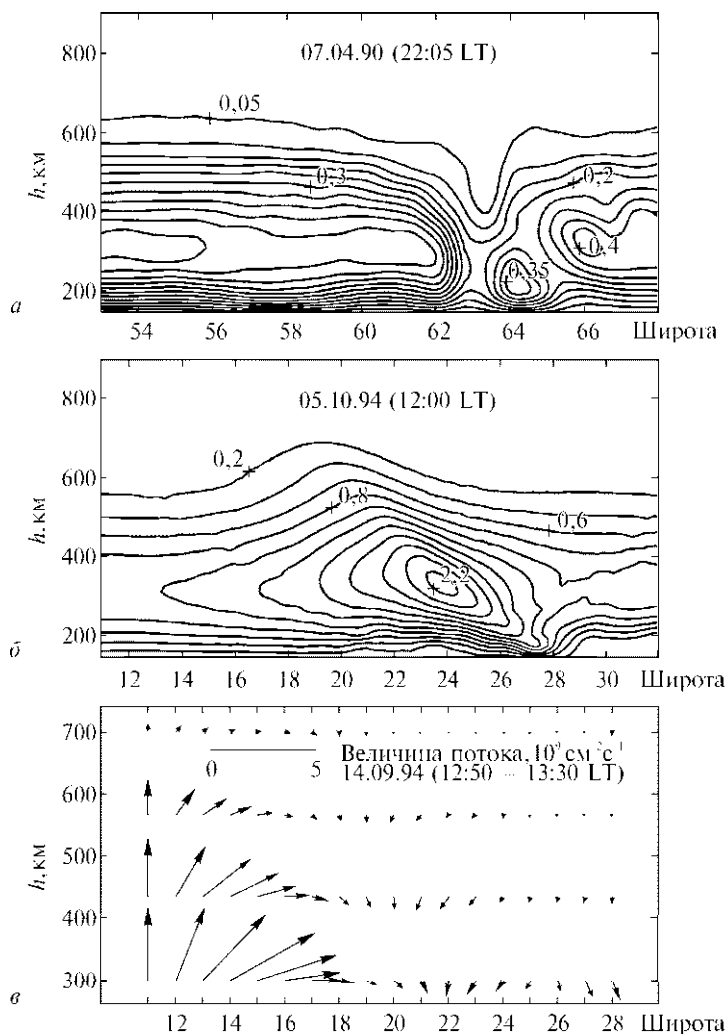


Рис. 15.2. Примеры двумерных сечений электронной концентрации N_e в области провала (а) и экваториальной аномалии (б), полученные методом радиотомографии. Сечения приведены в координатах географическая широта — высота в километрах. На рис. 15.2, в дан пример определения потоков плазмы (произведения плотности на скорость плазмы)

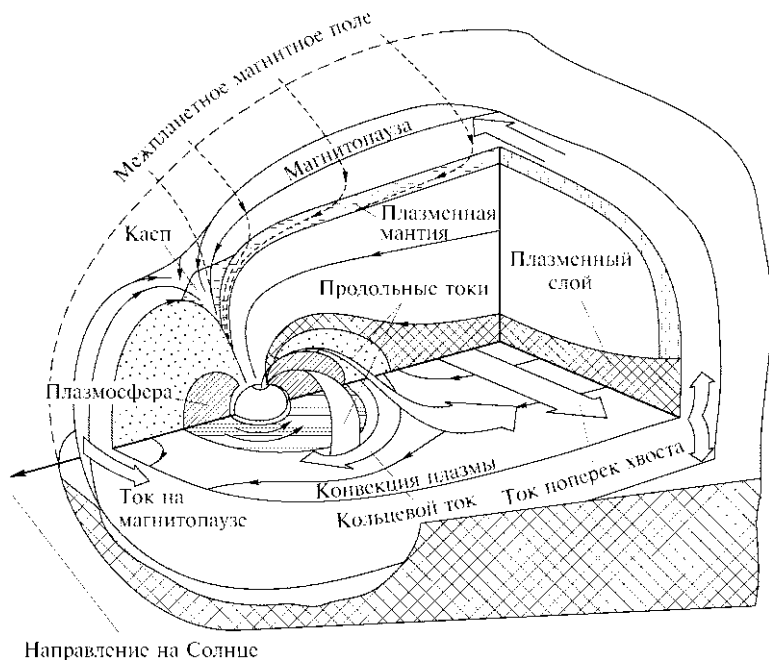


Рис. 15.3. Схема земной магнитосферы

высотах более 130–150 км. Тем не менее нередко условной нижней границей магнитосферы считают высоту около 1000 км, выше которой концентрация ионизованных компонент становится больше, чем нейтральных.

Движущийся от Солнца сверхзвуковой солнечный ветер, налетая на магнитосферу Земли, резко тормозится и образует ударную волну (на рис. 15.3 показана ближайшей к Солнцу поверхностью). Подсолнечная точка фронта ударной волны располагается на расстоянии около $13R_{\oplus}$. На фронте ударной волны происходит изменение направления движения частиц солнечного ветра. Их направленная скорость уменьшается, а тепловая скорость растет так, что плазма между фронтом ударной волны и магнитопаузой нагревается до нескольких миллионов градусов. Эта разогретая плазма обтекает магнитосферу, образуя *магнитный переходный слой*, в котором магнитное поле и движения плазмы солнечного ветра становятся менее упорядоченными. Во внутренней магнитосфере геомагнитное поле (до расстояний $3R_{\oplus}$) близко к полю магнитного диполя. Во внешней магнитосфере геомагнитное

поле на дневной стороне сжато солнечным ветром до расстояния $\approx 10R_{\oplus}$. На дневной стороне расположены каспы — воронки, образованные силовыми линиями геомагнитного поля, расширяющиеся от поверхности Земли вплоть до магнитопаузы. Через каспы, разделяющие силовые линии дневной магнитосферы и геомагнитного хвоста, плазма из магнитного переходного слоя может проникать в глубь магнитосферы. На ночной стороне магнитосферы расположен *геомагнитный хвост* (диаметр $\approx 40R_{\oplus}$, протяженность $\sim 10^3 R_{\oplus}$), который образуется двумя пучками силовых линий с противоположным направлением поля. Между пучками геомагнитного хвоста расположен плазменный слой (с толщиной $\approx 5R_{\oplus}$) — область со слабым магнитным полем и повышенной концентрацией горячей плазмы, нагретой внутримангнитосферными процессами до $\approx 5 \cdot 10^7$ К. Ток, ответственный за резкое изменение направления магнитного поля в долях хвоста, протекает в *нейтральном токовом слое* внутри плазменного слоя. Этот ток поперек хвоста направлен с утренней стороны на вечернюю. Он обусловлен дрейфом заряженных частиц под действием центробежной силы (центробежный дрейф) и силы, связанной с градиентом магнитного поля (градиентный дрейф) [136].

Проникновение солнечного ветра внутрь магнитосферы может происходить через пограничные слои, располагающиеся на дневной (*входной слой*) и ночной (*плазменная мантия* и плазменный слой) сторонах магнитосферы. Проникновение происходит вдоль пересоединившихся магнитных силовых линий. Пересоединение межпланетного магнитного поля плазмы солнечного ветра и геомагнитного поля носит импульсный характер и может происходить на магнитопаузе и в геомагнитном хвосте в ограниченных по размеру ($\approx R_{\oplus}$) областях. Область на дневной стороне, где происходит пересоединение, определяется знаком северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля B_z . При $B_z > 0$ пересоединение происходит в плазменной мантии в области каспа, при $B_z < 0$ магнитные поля пересоединяются во входном слое в области подсолнечной точки, где они антипараллельны. Пересоединившиеся силовые линии переносятся солнечным ветром с дневной стороны магнитосферы на ночную, образуя геомагнитный хвост. Такой перенос происходит также и в результате вязкого трения при обтекании магнитосферы солнечным ветром. Эффективность переноса магнитного потока под действием аномальной вязкости между магнитосферой Земли и межпланетной плазмой сравнима с эффектом переноса за счет

пересоединения. На ночной стороне происходит новое пересоединение, которое восстанавливает первоначальную конфигурацию магнитного поля солнечного ветра.

Под действием существующего электрического поля, направленного поперек хвоста, и магнитного поля хвоста плазма дрейфует от плазменной мантии к плазменному слою и из плазменного слоя по направлению к Земле. Такое движение плазмы называется магнитосферной конвекцией. Электрическое поле поперек хвоста обусловлено магнитным пересоединением и вязким трением между солнечным ветром и магнитосферой. Благодаря крупномасштабной конвекции плазма способна покидать магнитосферу через дневную магнитопаузу, при этом концентрация холодной плазмы за пределами плазмосферы резко уменьшается (по сравнению с концентрацией плазмы в плазмосфере, в которую конвекция не проникает). Плазмосферой называется область с повышенной концентрацией ($\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$) плазмы ионосферного происхождения и тепловой энергией $\sim 1,0 \text{ эВ}$. Граница плазмосферы (плазмопауза) образуется силовыми линиями, на которых концентрация плазмы резко падает до $0,1\text{--}1,0 \text{ см}^{-3}$. Геоцентрическое расстояние плазмопаузы $4R_{\oplus}$, оно меняется в зависимости от местного времени и интенсивности магнитосферных возмущений. Образование плазмосферы обусловлено суточным вращением Земли вместе с геомагнитным полем, увлекающим за собой плазму вплоть до высот $3 \cdot 10^4 \text{ км}$. На высоких широтах вдоль силовых линий из ионосферы в магнитосферу движется поток плазмы, называемый *полярным ветром*. Полярный ветер переносит нагретую плазму в удаленные области хвоста, пополняя магнитосферу ионами из верхней атмосферы.

Электрическое поле, возникающее в пограничных областях магнитосферы, приводит к появлению текущих вдоль магнитных силовых линий продольных электрических токов. Втекающие на утренней стороне ионосферы и вытекающие на вечерней токи замыкают цепь, в которой ионосфера является нагрузкой. Иными словами, в магнитосфере действует магнитогидродинамический генератор, преобразующий кинетическую энергию солнечного ветра в энергию магнитосферно-ионосферных токов, которая затем диссипирует внутри ионосферы. Известны соответствующие энергетические оценки: мощность солнечного ветра, падающего на поперечное сечение магнитосферы, составляет $\approx 2 \cdot 10^{13} \text{ Вт}$, а мощность солнечного ветра, инжектируемого в магнитосферу, — $\approx 3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}$. Мощности инъекции плазмы в магнитосферный кольцевой ток и джоулева разогрева ионосферы варьируются в

пределах $(2-100) \cdot 10^{10}$ Вт и $(5-100) \cdot 10^{10}$ Вт соответственно. Заметим, что мощность потоков энергичных частиц, вторгающихся в верхнюю атмосферу $(4-10) \cdot 10^{10}$ Вт [119].

Продольные токи существуют в магнитосфере постоянно, однако их интенсивность может меняться в несколько раз. Область их втекания и вытекания образует практически непрерывную полосу вдоль *аврорального овала*, являющегося проекцией плазменного слоя и каспа вдоль геомагнитных силовых линий на высоту 100–200 км над поверхностью Земли. К экватору от этой полосы существуют продольные токи противоположного направления, которые втекают в вечернем секторе и вытекают в утреннем. Эти токи обусловлены замыканием через ионосферу возникающих при конвекции плазмы из хвоста магнитосферы дрейфовых токов. Структура и интенсивность крупномасштабных продольных токов определяются направлением и величиной межпланетного магнитного поля. Азимутальная (направленная с утра на вечер) компонента поля B_y контролирует продольные токи в области каспа. При $B_y > 0$ ($B_y < 0$) токи втекают (вытекают) к экватору от каспа и вытекают (втекают) к полюсу от каспа. Общая величина продольных токов составляет $(1-3) \cdot 10^6$ А, они являются важным элементом электродинамической структуры магнитосферы, так как переносят энергию солнечного ветра от ее границ на ионосферные высоты.

Изменения солнечного ветра постоянно влияют на характеристики магнитосферы и потоки заряженных частиц. В определенных ситуациях возникают специфические магнитосферные возмущения длительностью 1–2 часа, получившие название магнитосферной суббури. Накладываясь во времени, магнитосферные суббури приводят к возникновению магнитной бури. Во время магнитных бурь и суббурь происходит усиленная диссипация энергии в магнитосфере ($\sim 10^{11}$ Вт). Эта энергия выделяется в виде джоулева тепла ионосферных токов (питаемых продольными токами из магнитосферы), вторжений в верхнюю атмосферу потоков. При этом возникают интенсивные полярные сияния. Основное энерговыделение $10^{-2}-10^{-3}$ Вт $\cdot$ м $^{-2}$ происходит вдоль аврорального овала на высотах полярных сияний 100–200 км. Вдоль аврорального овала наблюдаются яркие полярные сияния, и в ионосфере текут наиболее интенсивные токи. К полюсу и к экватору от аврорального овала потоки вторгающихся в атмосферу частиц резко уменьшаются, и энерговыделение падает до 10^{-5} Вт $\cdot$ м $^{-2}$. Вторжение заряженных частиц из плазменного

слоя, вызывающее диффузное авроральное свечение, связано с крупномасштабной конвекцией плазмы.

Ионы из атмосферы вытягиваются продольным электрическим полем в плазменный слой геомагнитного хвоста. В результате крупномасштабной магнитосферной конвекции ионы попадают во внутреннюю магнитосферу и составляют основную часть ионов магнитосферного кольцевого тока. Заряженные частицы, движущиеся вокруг Земли на расстояниях $(3-4)R_{\oplus}$, образуют магнитосферный кольцевой ток. Кольцевой ток состоит в основном из ионов H^+ , O^+ с добавкой He^+ , O^{++} , He^{++} . Азимутальное движение электронов на восток и протонов на запад обусловлено центробежным и градиентным дрейфами частиц с энергиями от 10 до 10^3 кэВ, инжектированных в область замкнутых геомагнитных силовых линий из плазменного слоя хвоста магнитосферы во время магнитосферных суббурь. Результирующий ток течет вокруг Земли в западном направлении и понижает горизонтальную составляющую геомагнитного поля Земли. Потоки энергичных частиц с энергией свыше 1 МэВ образуют радиационный пояс в области замкнутых геомагнитных линий, который является магнитной ловушкой для частиц. Во время суббурь происходит инжекция частиц из плазменного слоя в радиационный пояс. Потоки в радиационном поясе заметно увеличиваются в периоды магнитных бурь [136].

Ионосфера и магнитосфера излучают радиоволны различных частот. В диапазоне низких частот 1–10 кГц обнаружено радиоизлучение ионосферного происхождения, которое вызывается возмущениями ионосферной плазмы, вызванными вторжением заряженных частиц. Радиоизлучение разделяется на несколько типов: «шипение» теплового характера, дискретное с определенным тоном и смесь дискретных излучений, так называемые хоры. Излучение локализовано в области размером 200–1000 км, поскольку распространяется вдоль узкого пучка магнитных силовых линий. Источником разнообразных электромагнитных низкочастотных сигналов являются электрические разряды в тропосфере — атмосферерики. «Свистящие атмосферерики» (или вистлеры) звуковой частоты распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля. Удаленными ИСЗ обнаружено километровое радиоизлучение магнитосферы, всплески которого возникают в периоды локального усиления потоков высокоэнергичных электронов. Излучение концентрируется вокруг зоны полярных сияний.

Выше 130–150 км плотность энергии геомагнитного поля превышает плотность энергии вмороженной в магнитное поле

плазмы. Ниже 70–80 км движение плазмы определяется взаимодействиями при столкновениях с нейтральным газом. В промежуточной области высот 80–130 км ионы движутся совместно с нейтральным газом, а электроны уже привязаны к магнитным силовым линиям. Различные движения электронов и ионов являются причиной возникновения здесь слоя электрического тока. Эти вызываемые циркуляцией атмосферы токи принято называть динамо-токами, они вызывают медленные суточные вариации напряженности геомагнитного поля в десятки гамм. Кроме медленных наблюдаются и быстрые флуктуации и пульсации геомагнитного поля с периодами от долей секунды до минут. Причины возникновения кратковременных флуктуаций геомагнитного поля выяснены не до конца, по-видимому, они связаны с гидромагнитными колебаниями магнитосферы. Геомагнитные вариации вызываются также обусловленными вариациями солнечного ветра изменениями на границе магнитосферы. Типичные значения вариаций составляют десятки гамм, но после солнечных вспышек вариации геомагнитного поля могут достигать сотен гамм — это так называемые магнитные бури.

Следует отметить, что в магнитосферной физике существует ряд открытых вопросов. Например, что является первичным при рассмотрении магнитосферных проблем: магнитное поле B вместе с основным потоком плазмы u или электрическое поле E вместе с плотностью тока j ? Довольно длительное время продолжались дискуссии и сопоставления Bu -подхода с Ej -подходом. В последние годы решено, что ни один из подходов не может притязать на то, чтобы быть лучшим в решении всех проблем физики магнитосферы. Подходящий способ для решения конкретной магнитосферной проблемы должен выбираться на основе конкретных рассматриваемых случаев. Известны три различные интерпретации кратковременных (транзистентных) явлений в дневной магнитосфере. Связаны ли они с явлениями переноса потока, переносом плазмы или с импульсами давления солнечного ветра? При разработке правильной интерпретации данного явления в будущем предстоит определить, какая из перечисленных возможных причин встречается чаще и доминирует в переносе энергии и массы к магнитосфере. Неясна окончательно взаимосвязь бурь и суббурь. Существуют убедительные признаки того, что как суббури, так и усиление магнитосферной конвекции играют важную роль в развитии магнитной бури. В то время как суббури дают источник частиц для кольцевого тока и источник флуктуаций электрического поля для эффективного

радиального переноса, усиление магнитосферной конвекции создает арсену для более глубокого проникновения инжектируемых суббуревых частиц.

Наличие подобных противоречий в магнитосферной физике является признаком того, что эта дисциплина является живой, развивающейся и перспективной областью науки [170].

Космическая погода

В последние годы активно обсуждаются проблемы так называемой космической погоды. Космическая погода описывает условия, которые преобладают выше стратосферы, где отклики атмосферы на солнечное воздействие особенно сильны. Области, на которые воздействует Солнце, включают верхнюю атмосферу и ионосферу Земли. Космическая погода изменяет также интенсивность радиационных поясов магнитосферы. Космическая погода определяется главным образом воздействием Солнца на область межпланетного пространства за пределами досягаемости магнитного поля Земли. Эта область заполнена потоком плазмы из внешней атмосферы Солнца вместе с его магнитным полем, которые в совокупности и формируют солнечный ветер. О возмущенных штормовых (буревых) условиях космической погоды обычно судят по отклонениям магнитного поля, которые измеряются на спутниках и наземными инструментами. Об этих возмущениях можно также заключить по условиям в верхней атмосфере и ионосфере, где происходят интенсивные полярные сияния.

События, которые произошли на максимумах солнечной активности в течение последних солнечных циклов, изменили наше восприятие космической погоды. Одни из самых больших потоков солнечного излучения были измерены в августе 1972 г. между двумя посадками «Аполлона» на Луну. Если бы такие вспышки произошли, когда американские астронавты были на Луне, то они получили бы потенциально смертельные дозы облучения. На Земле была быстро повреждена одна из главных телекоммуникационных линий в США, а спутники на геостационарных орбитах подверглись воздействию энергичных частиц, испущенных с Солнца, которые оказали неблагоприятное влияние на спутниковые энергетические системы [169].

В период магнитной бури в марте 1989 г. трансформаторы на электростанциях в Канаде подверглись воздействию мощного импульса тока, индуцированного переменными магнитными полями на земной поверхности. Это событие привело к отключению электроэнергии в Квебеке, которое продолжалось несколько

часов. Вдобавок, в результате воздействия индуцированного тока был выведен из строя трансформатор на атомной электростанции в Нью-Джерси. Геомагнитные обсерватории подтвердили, что эти инциденты были связаны с возникновением крупных возмущений в Космосе. Последние четыре цикла показали, что возможны один-два экстраординарных эпизода в течение цикла. Возмущения космической погоды значительно увеличивают риск потери космических аппаратов. При буревых условиях спутники, расположенные на внешних границах радиационных поясов, могут внезапно оказаться под воздействием разрушающих потоков излучений. Более того, поскольку сигналы связи со спутниками проходят через ионосферу, существует большой риск, что сигналы управляющего центра будут искажаться при буревой космической погоде. Работа нескольких дорогих спутников, включая спутники «Intelsat» и «GOES-8» в 1995 г. и «Telesat» в 1996 г., пострадала при возмущениях космической погоды, а также в 1997 г., когда был потерян спутник «Telstar». Можно указать и на пример потери японского спутника осенью 2003 г. Таким образом, развивающиеся космические технологии, например, различные системы связи или системы GPS и ГЛОНАСС для глобальной навигации, являются уязвимыми для сильных возмущений, которые могут возбуждаться солнечной активностью.

С другой стороны, повышение интенсивности УФ излучения заметно разогревает верхнюю атмосферу и приводит к ее расширению. Возрастающее в результате увеличения плотности атмосферы на высоте спутника трение затормаживает спутник и меняет его орбиту. В частности, в 1970-х гг. американская космическая станция «Скайлэб» преждевременно вернулась в атмосферу Земли вслед за всплеском высокой солнечной активности. Возможное увеличение атмосферного торможения и сейчас является предметом беспокойства в отношении космического телескопа «Хаббл».

Как известно, поведение и выброс энергии ближайшей к нам звезды меняется в соответствии с циклом, длительность которого приблизительно 11 лет. Такое поведение прослеживалось столетиями по подсчету числа солнечных пятен — темных областей, которые появляются и исчезают на видимой «поверхности» Солнца. В последние годы поведение Солнца изучают по эффективным изображениям, получаемым с космических аппаратов типа «SOHO» (Solar and Heliospheric Observatory).

Сейчас широко признано, что магнитные или геомагнитные бури, определяющие состояние космической погоды, являются

откликами на особый тип солнечной активности, известный как выброс корональной массы, который был открыт несколько десятилетий назад в ходе наблюдений полного солнечного затмения. Внешняя атмосфера Солнца, которая называется короной, состоит из сильно ионизованного водорода и обычно невидима из-за яркого света хромосферы — кажущейся поверхности Солнца. Однако во время полного солнечного затмения корона становится видимой, поскольку белый свет из фотосферы рассеивается электронами во внешней атмосфере. Многочисленные лучеподобные структуры видны, когда электронная плотность выше, чем средняя. Эта структура изменяется во времени и является наиболее сложной, когда Солнце активно. С 1930-х гг. структура короны исследуется с помощью коронографов — приборов, закрывающих видимый диск Солнца и позволяющих исследовать корону. Структура короны определяется изменяющимся магнитным полем Солнца. Это поле близко к простому дипольному в период солнечного минимума, но во время максимума активности в нем преобладают гармоники высших порядков. Высшие гармоники формируют множество локализованных петель, связанных с активными областями на Солнце. Наблюдатели затмений могут видеть детали, напоминающие пузыри или языки материи, которые, по всей вероятности, и являются выбросами корональной массы.

Современные представления корональной физики предполагают, что выбросы являются локализованными крупномасштабными изменениями в короне. Эти изменения охватывают выброс материи, в основном в форме протонно-электронной плазмы, который превышает обычный уровень выноса плазмы, уносимой солнечным ветром. Кроме того, явление выбросов (извержений) предполагает, что в процесс вовлекаются скрученные магнитные петли, которые расширяются в межпланетное пространство. Скорости этих петель были измерены по последовательностям изображений коронографа. Начальные скорости лежат в диапазоне значений от десятков до 2000 км/с, что заметно превышает типичные скорости солнечного ветра. Выбросы сопровождаются вспышками радиоволн и мягкого рентгеновского излучения, которые длятся несколько часов. Рентгеновское излучение представляет собой тепловое излучение светящихся «аркад» серий петель, образованных разогретой плазмой. Взаимосвязь этих аркад и выбросов корональной массы до сих пор в стадии исследования. Видимый свет также присутствует в эмиссии аркад, но он слишком слаб по сравнению с ярким светом видимого диска фотосферы. Между тем, вращающиеся электроны, которые

претерпели ускорение в короне или при взаимодействии между выбросом корональной массы и солнечным ветром, излучают радиоволны. Вспышки являются проявлениями солнечной активности меньших масштабов, которые питают энергией корональную плазму вблизи сложных групп развивающихся солнечных пятен или активных областей. Вспышки часто, хотя и не всегда, связаны с выбросом корональной массы. Хотя принято считать, что выбросы приводят к изменениям крупномасштабных корональных магнитных полей, точные физические причины этих явлений остаются предметом интенсивных исследований.

Исследования космической погоды активно развиваются в последние годы, они объединяют анализ и интерпретацию солнечных, межпланетных наблюдений и наблюдений Земля–Космос. Существующая и планируемая международная система спутников вместе с наземной астрономией и наблюдениями Солнца дают возможность проводить мониторинг космической погоды. Из функционирующих спутников следует упомянуть «SOHO» и «TRACE» (Yokoh Transition Region and Coronal Explorer), которые осуществляют мониторинг Солнца. Вдобавок, «SOHO» вместе с «ACE» (Advanced Composition Explorer) и спутник NASA «Wind» проводят измерения в межпланетной среде около Земли. Состояние магнитосферы исследуется спутниками «Polar», «Интербол», «Geotail» и «SAMPEX» (Solar Anomalous Magnetospheric Particle Explorer). Ряд систем, включая спутники Defense Meteorological Satellite Programme, измеряют отклик верхней атмосферы на внешние воздействия. На Земле оптические и радиотелескопы осуществляют наблюдения Солнца. Аэрономические обсерватории проводят мониторинг состояния верхней атмосферы и ионосферы с помощью радаров, ионозондов и фотометров, разработанных для авроральных наблюдений. Магнитные обсерватории по всему миру определяют геомагнитные индексы, которые используются для оценки состояния космической погоды.

В заключение полезно привести некоторые сведения о магнитосферах и ионосферах других планет. Отличия от земной ионосферы обусловлены химическим составом атмосфер планет и разницей расстояний от Солнца. Днем максимум электронной концентрации на Марсе составляет $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на высоте 130–140 км, на Венере $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ на высоте 140–150 км. На Венере, лишенной магнитного поля, днем существует низко расположенная плазмопауза (~ 300 км), что обусловлено действием солнечного ветра. На Юпитере с его сильным магнитным полем обнаружены полярные сияния и радиационный пояс, значительно более интенсивные, чем на Земле.

Глава 16

Электромагнитные явления в атмосфере, распространение электромагнитных волн

Атмосферное электричество

В этой главе будет дано краткое описание атмосферных явлений, связанных с электромагнитными полями. Строение магнитного поля, структура магнитосферы и магнитные вариации обсуждались ранее. Рассмотрим электрическое поле Земли и вопросы распространения в атмосфере электромагнитных волн различных диапазонов, включая оптические и радиоволны.

В атмосфере постоянно присутствует электрическое поле. Частицы воды (туманы, облака и осадки) и пыли имеют электрический заряд. Принято называть зонами «хорошей погоды» зоны, где отсутствуют источники сильной ионизации и значительные скопления аэрозолей. Наоборот, зоны «плохой погоды» характеризуются присутствием названных локальных факторов (грозы, пыльные бури, осадки и др.). В зонах «хорошей погоды» у поверхности Земли существует стационарное электрическое поле с напряженностью E в среднем около 130 В/м. Земля при этом имеет отрицательный заряд около $3 \cdot 10^6$ Кл, а атмосфера в целом заряжена положительно. Поле E больше в средних широтах, а к полюсам и экватору убывает. Как правило, с высотой поле E монотонно убывает и на высоте 10 км не превышает нескольких В/м. Электрическое поле может с высотой возрастать при скоплении аэрозолей в слое перемешивания толщиной 300–3000 м. Закон убывания с высотой, за исключением слоя перемешивания, близок к экспоненциальному закону (рис. 16.1). Разность потенциалов между Землей и ионосферой составляет 200–250 кВ. Электрическое поле атмосферы нестационарно, вместе с локальными суточными и годовыми вариациями E отмечаются так называемые унитарные вариации — синхронные для всех пунктов суточные и годовые вариации поля. Локальные вариации связаны с изменениями величины и распределения электрических зарядов в данном районе. Глобальные унитарные вариации связаны с изменением электрического заряда Земли в целом [58].

Ионизацию нижней и средней атмосферы определяют в основном следующие факторы: космические лучи, ионизирующие всю атмосферу; УФ и рентгеновское излучение Солнца. Ионизирующее действие УФ и рентгеновского излучения проявляется на высотах более 50–60 км. Максимум скорости образования ионов под действием галактических космических лучей и продуктов ядерных реакций находится вблизи тропопаузы на высоте около 15 км, здесь возникает слой ионизации с концентрацией ионов около $6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. Излучение радиоактивных веществ верхних слоев Земли и приповерхностного слоя воздуха, проявляется до высот в несколько километров. Создаваемая различными ионами электропроводность атмосферы σ очень мала: $\sigma = (2-3) \times 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ у поверхности Земли. Электропроводность определяется совокупностью ионов и равна

$$\sigma = \sum_i e n_i w_i,$$

где e — элементарный заряд, n_i — концентрация ионов с подвижностью w_i . Основной вклад в σ вносят легкие ионы с $w > 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \cdot \text{В}$, средние и тяжелые ионы на величину σ заметно не влияют. В слое перемешивания электропроводность незначительно увеличивается с высотой, а выше растет примерно по экспоненциальному закону, достигая на высоте 10 км значения $\sigma \approx 30 \cdot 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. Антропогенная деятельность приводит к заметным изменениям электрических параметров атмосферы. Увеличение запыленности атмосферы приводит к уменьшению σ и соответствующему возрастанию E в слое перемешивания. С другой стороны, существуют сильные антропогенные источники ионизации. Например, испытания атомных бомб

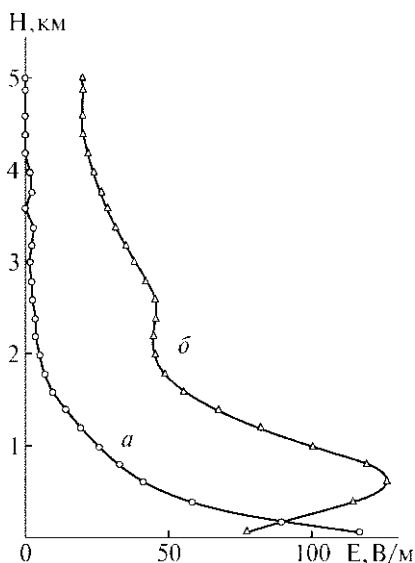


Рис. 16.1. Типичный ход электрического поля E с высотой в зонах «хорошей» погоды: a — в чистой атмосфере, $б$ — над континентами

приводят к увеличению ионизации атмосферы, увеличению σ и уменьшению E . Электрическое поле атмосферы вызывает ток проводимости с плотностью $j = \sigma E$ около $(2-3) \cdot 10^{-12}$ А/м². Суммарный ток через всю поверхность Земли составляет 1800–2000 А. В атмосфере текут также токи конвективного переноса объемных зарядов и токи диффузии. В слое перемешивания плотность этих токов сравнима с плотностью тока проводимости. Постоянная времени перетекания заряда Земли в ионосферу за счет токов проводимости ≈ 500 с. Однако заряд Земли практически не меняется за счет существования заряжающих Землю «генераторов» атмосферного электричества.

Основными «генераторами» атмосферного электричества являются облака и осадки. С увеличением толщины облаков, с укрупнением частиц облаков и усилением осадков усиливаются процессы электризации. Связанные с электропроводностью и турбулентным перемешиванием процессы переноса в облаках малы, поэтому даже слабые процессы электризации, действующие в облаках, создают заметные электрические эффекты. В слоистых и слоисто-кучевых облаках плотность объемных зарядов $\rho = 10^{-10}$ Кл/см³, что на порядок превышает ρ чистой атмосферы, $E = 100-300$ В/м. Структура распределения зарядов в облаках достаточно сложна. Как правило, облака заряжены положительно в верхней части, а в нижней части расположена зона отрицательных зарядов. Однако на нижней кромке облаков присутствуют в основном положительные заряды. В кучеводождевых облаках с ливнем и грозой соответствующие средние значения $\rho = (0,3-10) \cdot 10^{-9}$ Кл/м³ и $(3-30) \cdot 10^{-9}$ Кл/м³, а $E = (1-5) \cdot 10^4$ В/м и $E = (5-20) \cdot 10^4$ В/м. В зонах, где зарождаются молнии, напряженность поля и плотность объемных зарядов могут превосходить средние значения на порядок и более. Другими, более слабыми «генераторами» атмосферного электричества являются извержения вулканов и пылевые бури, снежные и водные метели, облака и осадки, атмосферные выбросы промышленных источников и т. д. Извержение вулканов, песчаные бури, метели, торнадо также иногда приводят к возникновению грозных явлений.

Генерируемые облаками линейные молнии являются разновидностью искрового разряда, возникающего в отсутствие электродов в массе заряженных и хорошо изолированных друг от друга частиц. Линейные молнии подразделяются на «наземные» (ударяющие в землю) и внутриоблачные молнии. Средняя длина молниевых разрядов составляет несколько километров, однако

длина внутриоблачных молний достигает до 50–150 км. В последние годы были зарегистрированы молнии между тропосферой и нижней ионосферой. Токи наземных молний варьируются в пределах ≈ 20 –500 кА, что на порядок превышает токи внутриоблачных разрядов. Кроме линейных наблюдаются четочные (цепи светящихся «четок») и шаровые молнии. Последние представляют собой светящиеся образования с размерами 10–20 см и продолжительностью жизни от секунд до минут. Отметим, что до настоящего времени нет полной теории шаровой молнии. Существует довольно много гипотез и теоретических работ, однако они не объясняют даже основные особенности поведения шаровой молнии [147].

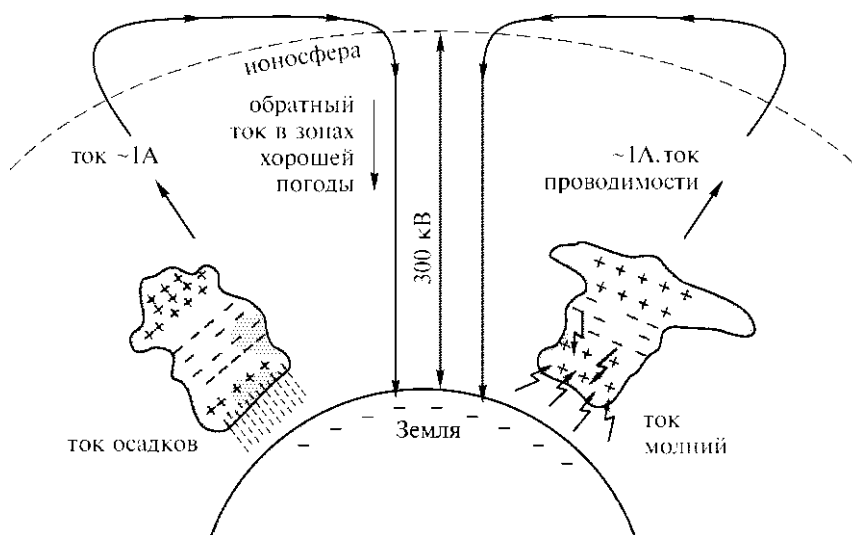


Рис. 16.2. Схема глобальной электрической цепи, которая заряжается грозами

Глобальная электрическая цепь, как схематично показано на рис. 16.2, заряжается грозами. Электрическое поле Земли и ток Земля–атмосфера в зонах «хорошей погоды» поддерживаются процессами в зонах «плохой погоды». Между отрицательно заряженной поверхностью Земли и верхними слоями атмосферы поддерживается почти постоянная разность потенциалов величиной около 300 кВ. Токи порядка 1 А, текущие от вершин грозовых облаков, помогают поддерживать указанную разность

потенциалов; примерно такой же ток должен течь от поверхности Земли к нижним частям облаков. Точнее, плотность токов осадков на Землю составляет $j \approx 5 \cdot 10^{-12} - 10^{-11} \text{ А/м}^2$ в средних широтах и возрастает к экватору. Плотность тока из ливневых облаков $j \approx 10^{-10} - 10^{-9} \text{ А/м}^2$, из грозовых $j \approx 10^{-9} - 10^{-8} \text{ А/м}^2$. Полный ток, текущий на Землю от одного грозового облака, равен в средних широтах около 0,01–0,1 А, ближе к экватору возрастает до 0,5–1 А и даже нескольких ампер.

В больших масштабах ток в зонах «хорошей погоды» величиной около 2000 А, который переносит положительный заряд от верхних слоев атмосферы к Земле, быстро нейтрализовал бы разность потенциалов в 300 кВ, если бы грозовые разряды не «перезаряжали» глобальную электрическую цепь. Однако грозы, главным образом тропические, переносят огромное количество отрицательных зарядов к Земле и в основном компенсируют ток в зонах «хорошей погоды». Долгое время считалось, что около 2000 гроз (эквивалентных тропическим), в среднем сосуществующих одновременно на Земле, дают ток около 2000 А, компенсирующий токи потери отрицательного заряда Земли за счет токов в зонах «хорошей погоды», и что колебания грозовой активности во времени обуславливают наблюдаемые унитарные вариации. Однако позднее выяснилось, что ток гроз заметно меньше указанного, и что унитарные вариации связаны также с облаками слоистых форм и с процессами конвекции в атмосфере по всей поверхности Земли в целом [58].

Электромагнитные волны в атмосфере

Характеристики распространения электромагнитных волн являются функциями материальных констант среды, а именно диэлектрической постоянной ϵ , магнитной проницаемости μ и проводимости σ . Вместо ϵ и μ часто используются их относительные величины ϵ_r и μ_r , являющиеся отношениями ϵ и μ к их значениям в вакууме ϵ_0 и μ_0 . В задачах распространения волн в тропосфере и стратосфере проводимостью можно пренебречь. Как известно, показатель преломления определяется как отношение скорости света в вакууме c_0 к скорости света в среде c :

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}.$$

Поскольку μ_r в воздухе близко к единице, то мы далее полагаем $\mu_r = 1$, и единственной определяющей величиной является диэлектрическая постоянная ϵ_r . Следует заметить, что ϵ_r является

функцией частоты ω или длины волны λ , поэтому показатель преломления имеет аналогичную зависимость:

$$n(\lambda) = \sqrt{\varepsilon_r(\lambda)}.$$

Зависимость характеристик распространения волн от частоты (длины волны) называется явлением дисперсии. Термин был введен И. Ньютоном, рассмотревшим разложение пучка белого света, преломляющегося на границе раздела сред, на пучки различных длин волн с разными углами преломления.

Показатель преломления определяется поляризуемостью вещества электрическим полем, воздействующим на неполяризованные и поляризованные молекулы. Поляризованная молекула обладает собственным постоянным дипольным моментом. Поляризуемость вещества можно разделить на два эффекта. Первый связан с деформацией всех молекул или атомов под воздействием приложенного электрического поля (что приводит к появлению индуцированного дипольного момента); второй возникает из-за ориентации постоянного диполя, что относится только к поляризованным молекулам. Явление дисперсии связано с атомными и молекулярными резонансами, имеющими место в спектре колебаний атома или молекулы. В газах низкого давления атомы и молекулы расположены достаточно далеко друг от друга, и их взаимодействием можно пренебречь. Основное соотношение для поляризованного газа при низком давлении (эффекты деформации и ориентации) основано на модели Лоренца гармонических осцилляторов в веществе и дебаевской теории релаксации для поляризованных газов:

$$(n^2 - 1) = \varepsilon_r - 1 = \frac{N_j}{\varepsilon_0} (\alpha + \alpha_p),$$

где ε_r — относительная диэлектрическая постоянная, ε_0 — диэлектрическая постоянная в вакууме, α — средняя поляризуемость молекул газа, связанная с появлением у них индуцированного дипольного момента под воздействием поля в предположении, что взаимодействие между молекулами отсутствует, α_p — поляризуемость, связанная с ориентацией в поле постоянного собственного дипольного момента молекул, N_j — плотность данных осцилляторов (молекул или атомов).

Из модели затухающего осциллятора с внешним электрическим полем как вынуждающей силой для неполяризованной

молекулы следует, что

$$\alpha = \frac{e_0^2}{m_e} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (16.1)$$

где e_0 — заряд и m_e — масса электрона, $\omega = 2\pi f$ — угловая частота внешнего поля, ω_0 — резонансная частота осциллятора, γ — коэффициент затухания. В общем случае молекула имеет несколько резонансов с соответствующими частотами ω_{0j} . Поэтому суммарная поляризуемость определяется суммой слагаемых вида (16.1) с соответствующими плотностями осцилляторов N_j .

Показатель преломления для затухающего осциллятора будет комплексным:

$$n_c = n - i\chi,$$

где n — действительный показатель преломления и χ — коэффициент поглощения. Для неполяризованных газов при низком давлении, таких как атмосфера, в приближении

$$\chi \ll 1, \quad |n - 1| \ll 1, \quad (n^2 - 1) = 2(n - 1),$$

получаются следующие соотношения для осцилляторов с одной резонансной частотой:

$$\begin{aligned} n - 1 &= \frac{Ne_0^2}{2\varepsilon_0 m_e} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}, \\ \chi &= \frac{Ne_0^2}{2\varepsilon_0 m_e} \frac{\gamma\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2}. \end{aligned} \quad (16.2)$$

В общем случае правые части соотношений заменяются на суммы с соответствующими частотами ω_{0j} и различными плотностями осцилляторов N_j .

Частотная зависимость χ представляет собой характерную (лоренцевскую) кривую с максимумом на резонансной частоте, где поглощение максимально, при этом n проходит через ноль. Частотные интервалы, в которых $\frac{dn}{d\omega}$ положительно ($\frac{dn}{d\lambda}$ отрицательно), называются интервалами нормальной дисперсии, как например, область видимого света. Однако в окрестности резонансной частоты дисперсия меняет знак ($\frac{dn}{d\omega}$ отрицательно); это называется аномальной дисперсией.

Коэффициент затухания χ определяет ширину полосы поглощения. Для диапазона видимого света аномальная дисперсия не представляет большого интереса, так как резонансные частоты атмосферных газов лежат почти исключительно в ультрафиолетовом или инфракрасном диапазонах спектра. Поэтому показатель преломления для видимого света всегда больше единицы.

Поляризуемость воздуха невелика, и показатель преломления для видимого света лишь немного превышает единицу. Приято представлять показатель преломления тропосферы в форме

$$n = 1 + N_T 10^{-6},$$

где N_T — безразмерный индекс рефракции тропосферы. Часто индекс рефракции разделяют на индексы рефракции «сухой» и «влажной» тропосферы. Типичные средние значения N_T составляют 270 для «сухой» тропосферы и достигают 60 единиц для «влажной». В целом вариации показателя преломления атмосферы от единицы не превышают в оптическом диапазоне 10^{-4} для различных длин волн. Изменение условий в тропосфере приводит к вариациям показателя преломления не более 10^{-3} . Иными словами, рефракционные эффекты в воздухе достаточно малы.

Уравнение (16.1) включает также два крайних значения: статической поляризации ($\omega = 0$) и высокочастотного (например рентгеновского) излучения ($\varepsilon \rightarrow 1$ при $f \rightarrow \infty$), когда частота волны много больше всех характерных частот системы. В случае высокочастотного излучения

$$n^2 = 1 - \frac{Ne_0^2}{\omega^2 m_e} \equiv 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \equiv 1 - \frac{f_p^2}{f^2}. \quad (16.3)$$

Здесь введена так называемая «плазменная» частота

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi},$$

где

$$\omega_p^2 = \frac{Ne_0^2}{m_e}.$$

Интересно, что соотношение для показателя преломления электромагнитных волн в ионизированной среде со свободными электронами будет иметь такой же вид (16.3), где N — концентрация свободных электронов. В случае свободных электронов собственная частота осциллятора $\omega_0 \rightarrow 0$, поэтому (16.3) прямо

следует из (16.1). Взаимодействие электромагнитных волн с электронами плазмы существенно сильнее, чем с положительными ионами, поскольку масса положительных ионов по крайней мере на три порядка превышает массу электрона. В большинстве задач распространения волн достаточно учитывать только влияние электронов на показатель преломления. Показатель преломления ионизированной плазмы меньше единицы и стремится к единице на частотах, существенно превышающих плазменную частоту ω_p . Типичное значение дневного максимума (см. рис. 15.1) электронной концентрации ионосферы $N \sim 10^6 \text{ см}^{-3}$. При этом плазменная частота $f_p \approx 10 \text{ МГц}$, что соответствует диапазону коротких радиоволн. Обычно плазменные частоты ионосферных слоев варьируются в пределах до 10–20 МГц, в зависимости от времени суток, сезона, солнечной активности, геомагнитных возмущений, солнечного ветра и других факторов.

Описанные выше характеристики распространения электромагнитных волн обуславливают и позволяют объяснить многие атмосферные явления. Вначале рассмотрим некоторые вопросы атмосферной оптики, которая изучает рассеяние, поглощение, преломление, отражение и дифракцию ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения в атмосфере Земли. Оптика атмосферы — одна из старейших наук, с ней связано изучение связей между оптическими и метеорологическими явлениями в атмосфере. Оптика атмосферы позволила исследовать и интерпретировать многие атмосферные явления: радуги, гало, глории, венцы, миражи, зори и цвет неба. С оптикой атмосферы связаны открытия явления рассеяния излучения, доказательство молекулярного строения атмосферы и справедливости кинетической теории газов, определение числа Авогадро.

Рассмотрим кратко рассеяние оптических волн в атмосфере. Основы молекулярной оптики заложены Рэлеем, который в конце XIX в. показал, что солнечные лучи при прохождении через атмосферу рассеиваются молекулами воздуха. Характер рассеяния в первую очередь зависит от соотношения между длиной волны и размером рассеивающих частиц. Если линейные размеры рассеивающих частиц много меньше длины волны ($a \ll \lambda$), то такое рассеяние называют рэлеевским. Молекулы воздуха имеют размеры порядка 0,1 нм, что на 2–3 порядка меньше длины волн УФ и видимого света. Рэлеевское рассеяние рассматривается в дипольном приближении, когда рассеиватель можно заменить

элементарным классическим излучателем — электрическим диполем, находящимся в поле электромагнитной волны. Тогда вектор Умова Пойнтинга $\mathbf{S}$ рассеянной волны определяется выражением

$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] = \frac{\mu_0}{4\pi} \left| \ddot{\mathbf{d}} \right|^2 \sin^2 \Theta \frac{\hat{\mathbf{r}}}{cR^2}, \quad (16.4)$$

где $\mathbf{d} = e\mathbf{r}$ — дипольный момент осциллятора (молекулы) с радиусом-вектором $\mathbf{r}$, $\hat{\mathbf{r}}$ — единичный радиус-вектор, направленный от рассеивателя к точке наблюдения, R — расстояние между рассеивателем и точкой наблюдения, Θ — угол между $\mathbf{d}$ и $\hat{\mathbf{r}}$, c — скорость света. Интенсивность излучения диполя равна нулю в направлении вдоль диполя $\mathbf{d}$, по мере увеличения угла Θ интенсивность нарастает и достигает максимума на всех направлениях, перпендикулярных диполю. Вторая производная дипольного момента по времени $\ddot{\mathbf{d}}$ пропорциональна квадрату частоты ω распространяющейся электромагнитной волны при условии, что $\omega \ll \omega_0$ — собственных частот осцилляторов, находящихся в УФ диапазоне спектра. Отсюда интенсивность рассеяния, определяемая вектором Умова Пойнтинга, пропорциональна четвертой степени частоты или обратно пропорциональна четвертой степени длины волны:

$$S \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}. \quad (16.5)$$

Такую зависимость интенсивности рассеяния от частоты (длины волны) называют иногда законом Рэлея. Закон Рэлея объясняет, в частности, голубой цвет неба и красноватый цвет Солнца на восходе и заходе. При наблюдении небосвода днем в глаз попадает рассеянное излучение, в котором преобладает высокочастотная (голубой-фиолетовый) часть спектра. На восходе и заходе мы наблюдаем свет, в котором в результате рэлеевского рассеяния высокочастотная часть спектра видимого света ослаблена сильнее низкочастотной (красный оранжевый), поэтому цвет Солнца приобретает красноватый оттенок. Существует заметная разница в длине пути пересекающих атмосферу солнечных лучей на восходе закате или когда Солнце находится в зените. В последнем случае путь и соответственно рассеяние высокочастотной части спектра много меньше, и цвет Солнца меняется незначительно — оно приобретает лишь желтоватый оттенок.

Вслед за первыми работами Рэлея по молекулярному рассеянию света Мандельштам показал, что свет рассеивается не

молекулами воздуха, а флуктуациями плотности воздуха. Теория флуктуационного рассеяния, разработанная в начале XX в. Смолуховским и Эйнштейном, приводит к тем же формулам, которые ранее были получены Рэлеем. Однако такое флуктуационное рассеяние по-прежнему называют молекулярным, поскольку флуктуации плотности обусловлены молекулярно-кинетической природой вещества.

В реальной атмосфере всегда содержится значительное количество аэрозоля (капельки воды и водных растворов, частицы минеральной и органической пыли, частицы сажи и пр.). Теория рассеяния и поглощения света частицами аэрозоля, разработанная Ми также в начале XX в., описывает характеристики рассеяния и поглощения света частицами с размерами, сопоставимыми или превышающими длину волны оптического излучения. Главной особенностью рассеяния Ми является его слабая зависимость от длины волны (в отличие от сильной степенной зависимости (16.5)) для частиц, размеры которых существенно меньше длины волны излучения.

В оптике атмосферы известны разнообразные явления, связанные с рассеянием Ми на разных частицах атмосферы. Малая или полная непрозрачность тумана и его белесый цвет связаны с рассеянием Ми на каплях воды. При задымлении атмосферы небо приобретает белесый оттенок. Голубой в зените небосвод сереет к горизонту. Световые явления в атмосфере, сопровождающие восход и заход Солнца, определяются состоянием атмосферы, главным образом ее замутненностью; чем больше в атмосфере пыли и водяного пара, тем интенсивнее и разнообразнее окраски зари.

Рассмотрим некоторые оптические явления в атмосфере, связанные с преломлением (рефракцией) света. Как уже отмечалось выше, рефракционные эффекты в воздухе достаточно малы. Однако в силу заметного отличия показателей преломления воды и воздуха рефракция света в водяных каплях существенна. Именно рефракционные эффекты в каплях воды порождают такие интересные и красивые явления, как радуга и гало.

Радуга — разноцветная дуга на небосводе, возникающая в результате разложения солнечного света в каплях дождя на спектральные составляющие. Схема образования радуги приведена на рис. 16.3, а. Рефракция лучей в каплях дождя показана на рис. 16.3, б. Первичная радуга с угловым радиусом 41° образуется за счет двукратного преломления и однократного отражения солнечного луча от внутренней поверхности капли, вторичная —

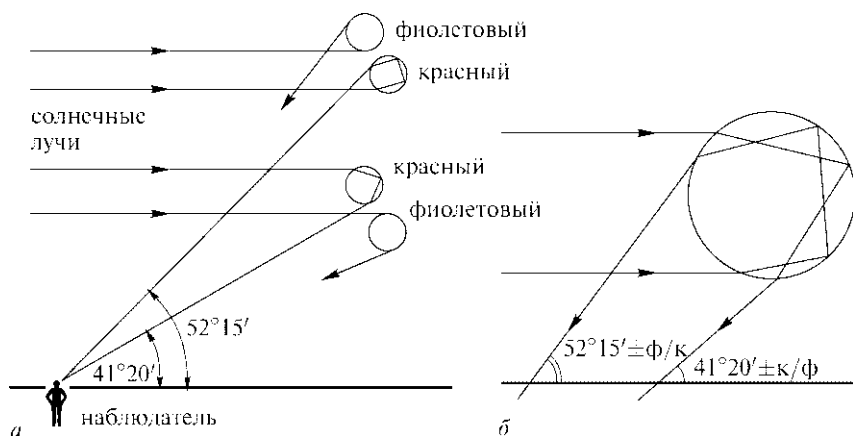


Рис. 16.3. Схема образования радуги (а) и рефракция лучей в капле дождя (б)

с угловым радиусом 52° возникает за счет двукратного преломления и двукратного отражения луча в капле воды. Порядок следования цветов в первичной и вторичной радугах противоположен, как это ясно из схем рис. 16.3. Угловая ширина радуги составляет $1,7^\circ$ для первичной и $3,1^\circ$ для вторичной. Отражения от внутренней границы капли частичные, поэтому интенсивность вторичной радуги существенно меньше. Радуги более высоких порядков имеют столь малую интенсивность, что в атмосфере не наблюдаются, но могут быть зарегистрированы в лабораторных условиях.

Гало — радужное кольцо вокруг Солнца или Луны наблюдается при рассеянии прямых солнечных лучей на ледяных кристаллах облаков (обычно перистых и высокостолбчатых). Отражение и преломление света ледяными кристаллами перистостолбчатых облаков может приводить к ряду подобных оптических явлений: ложные солнца и луны, дуги, столбы, пятна.

Как уже отмечалось выше, рефракционные эффекты в чистом воздухе достаточно малы. Тем не менее, рефракция световых лучей в атмосфере приводит к кажущемуся смещению видимого положения светил, к депрессии или расширению видимого горизонта, к возникновению различного рода миражей.

Преломление лучей определяется законом Снеллиуса, который можно представить в виде постоянства произведения показателя преломления среды на угол между лучом и нормалью к поверхности раздела или к «слоям» (к направлению градиента

показателя преломления) среды:

$$n \sin \Theta = \text{const.}$$

С увеличением показателя преломления уменьшается угол Θ , поэтому можно сказать, что при распространении луч «загибается» в сторону роста показателя преломления n или противоположно

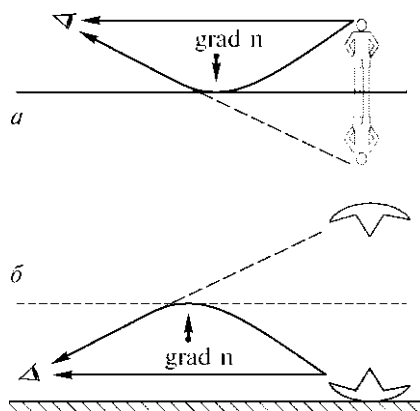


Рис. 16.4. Схемы образования нижнего (а) и верхнего (б) миражей

направлению градиента n . Показатель преломления тропосферы (16.2) больше единицы. Добавка к единице пропорциональна плотности осцилляторов, т. е. плотности воздуха, поэтому градиент n имеет то же направление, что и градиент плотности воздуха. Нередко в атмосфере возникают сильные градиенты показателя преломления, что приводит к «загибанию» лучей в сторону таких градиентов. Этим объясняется явление миражей. На рис. 16.4 приведены схемы нижнего и верхнего миражей. Нижний мираж (рис. 16.4, а) возникает при сильном прогреве воздуха у нагретой поверхности, градиент n при этом направлен вниз, что приводит к изгибу лучей и «отражению» их от воздуха вблизи нагретой поверхности. Поскольку рефракционные эффекты в воздухе все-таки слабые, такое явление наблюдается при малых (скользящих) углах падения, при этом можно наблюдать отраженные вниз предметы. Нижние миражи часто наблюдаются летом на прогретых дорогах с твердым покрытием. В отсутствии предмета вдали наблюдается отражение небосвода, что напоминает лужицы на дороге. Верхний мираж (рис. 16.4, б) возникает при скользящем отражении от слоя теплого воздуха, расположенного над охлажденным морем, при этом наблюдаются перевернутые изображения кораблей. При наличии приподнятого над поверхностью слоя инверсии или неоднократной перемены знака градиента показателя преломления с высотой могут наблюдаться и более сложные миражи, состоящие из нескольких сдвинутых изображений объекта.

Здесь следует упомянуть и такие известные оптические атмосферные эффекты, как венцы и глория. Венцы — светлые

радужные кольца, окружающие Солнце, Луну, яркие звезды, фонари и другие источники при наблюдении их через тонкие облака. Глория — аналогичные цветные кольца, но наблюдающиеся при отражении от облаков вокруг противосолнечной точки, например, наблюдаемые с самолета вокруг его тени на фоне облаков. Физически венцы и глория обусловлены дифракцией света на взвешенных в воздухе каплях или кристаллах льда, в прошедшем или отраженном свете соответственно [128].

Показатель преломления плазмы (16.3) для радиоволн меньше единицы. Нетрудно понять, что если показатель преломления уменьшается с высотой h (растет электронная концентрация), то угол отклонения луча от вертикали будет нарастать и достигнет $\pi/2$ на некоторой высоте h_0 , где произойдет «поворот» луча и распространение его к Земле:

$$n_0 \sin \Theta_0 = n(h) \sin \Theta(h) = n(h_0) \sin \frac{\pi}{2} = n(h_0).$$

Принимая во внимание, что у поверхности земли $n(h=0) \equiv n_0 = 1$, получим связь:

$$n^2(h_0) = 1 - \frac{f_p^2(h_0)}{f^2} = \sin^2 \Theta_0.$$

Отсюда следует, что от ионосферы при наклонном зондировании отражаются радиоволны с частотами, меньше частоты $f = \frac{f_p}{\cos \Theta_0}$, которую называют критической частотой при наклонном зондировании. Отражение на частотах зондирования, меньших частоты $f = f_p$, равной плазменной частоте, будет наблюдаться и при вертикальном падении на слоистую плазму, т. е. критическая частота при нормальном зондировании равна плазменной частоте. Напомним, что типичные критические частоты при нормальном зондировании или плазменные частоты ионосферы порядка $f_p \sim 10$ МГц (чаще всего в пределах 1–5 МГц для E -слоя и 5–15 МГц для F -слоя). Такое отражение радиоволн от ионосферы аналог полного внутреннего отражения в оптике. В области, где показатель преломления становится чисто мнимым, волна экспоненциально

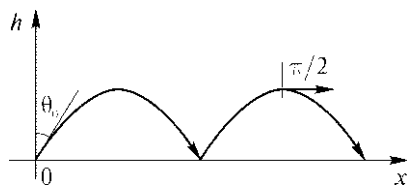


Рис. 16.5. Траектория лучей в слоистой плазме с отражением радиоволн от Земли, когда концентрация плазмы растет с высотой h

затухает. Траектория луча в слоистой плазме схематично изображена на рис. 16.5. Именно таким образом распространяются короткие радиоволны в ионосфере, испытывая многократные отражения от Земли. Такие многоскачковые траектории иногда неоднократно огибают земной шар, и наблюдается явление кругосветного эха радиосигналов.

Глава 17

Основные понятия экологии

Что такое экология?

Существуют различные понятия термина «экология». Согласно классическому определению экология, как самостоятельная наука, относится к биологии. Термин «экология» был предложен немецким биологом-материалистом Э. Геккелем. Он считал экологию наукой об отношении организмов к окружающей среде. В переводе с греческого дает: *oikos* — дом, *logos* — учение. Таким образом, экология — это наука о среде обитания. Экология изучает не отношение отдельных организмов к внешней среде, а сообщества растений, животных в их взаимодействии с внешней средой. В этом взаимодействии происходит трансформация энергии и вещества. Современная экология широко использует методы исследования сложных систем. С биологической точки зрения экология изучает организацию и функционирование надорганизменных систем различных уровней сложности.

Наряду с таким «биологическим» определением экологии в современном обществе существует понятие «экология» как представление об уровне техногенного загрязнения окружающей среды, представление об экологии как о науке, занимающейся изучением антропогенного воздействия на окружающую среду и разработкой методов уменьшения такого воздействия. Тенденция отождествления экологии с науками, занимающимися комплексом проблем взаимодействия человека с окружающей средой, характерна, прежде всего, для небиологов. Существует ориентация на выделение экологии из комплекса биологических наук и обособление ее в естественно-научную дисциплину, задачей которой является исследование биосферы. Подобные представления об экологии являются ограниченными, но они наиболее широко распространены в обществе и среди ученых, занимающихся прикладными исследованиями.

Экология имеет сложную структуру. Например, Реймерс насчитывал около 150 экологических наук. Выделим только основные блоки его подразделения, в которые входит много отдельных научных направлений:

- экология систематических групп;
- экология иерархии живого;
- факторальная экология;
- экология сред обитания;
- хроноэкология;

экспериментальная экология;

экология человека;

прикладная экология;

экология поселений;

экология культур.

По широте охвата экология смыкается с науками, изучающими биосферу Земли. Биосфера – сложная термодинамически открытая система, включающая в себя верхние слои земной коры, гидросферу, атмосферу, вместе с населяющими их живыми организмами. Согласно Вернадскому, в формировании биосферы играла и играет важнейшую роль живая природа. Почва, многие осадочные породы, атмосфера являются продуктом жизнедеятельности живой природы. Человек существенно изменил характер взаимоотношений живой и неживой природы. В настоящее время объем горных выработок по масштабу соизмерим с объемом горных пород, перемещаемых при землетрясениях. При добыче только черных и цветных металлов ежегодно в мире в отходах откладывается около 3 млрд м³ хвостов (профессиональный термин, обозначающий отходы в горнодобывающей промышленности). Ежегодный объем нефтепродуктов, поступающих в мировой океан, уже превышает объем нефти, поступающий из недр в океан естественным путем. Техногенные потоки ряда химических элементов в биосфере превышают естественные потоки этих же элементов. Например, только за счет сжигания угля в окружающую среду поступает ртути в 8700, мышьяка в 12, урана в 60, кадмия в 40, бериллия и циркония в 10, олова и ванадия в 4 раза больше, чем их поступает в результате естественного биогеохимического круговорота. В ряде развитых стран зарегулировано до 60–70% речного стока. Гигантской величины достиг выброс парниковых газов в атмосферу, приводящий, согласно некоторым оценкам, к глобальному потеплению. В биосферу поступает

все больше химических соединений, не имеющих естественных процессов утилизации, поскольку эти соединения не образуются в природе естественным путем. Ясно, что этот перечень, дающий некоторое представление о масштабах антропогенного воздействия на биосферу, может быть продолжен.

Глобальная эволюция Земли

Образование Земли. Земля в катархее (4–4,6 млрд лет назад)

Согласно современным космогоническим представлениям, заложенным О. Ю. Шмидтом еще в начале 40-х г., Земля и Луна, как и другие планеты Солнечной системы, образовались за счет *аккреции* (слипания и дальнейшего роста) твердых частиц газопылевого протопланетного облака.

При аккреции Земли выделилось гигантское количество гравитационной энергии — около $23,3 \cdot 10^{38}$ эрг. Этой энергии более чем достаточно не только для расплавления земного вещества, но и для его полного испарения. Однако большая часть этой энергии выделялась в приповерхностных частях растущей Протоземли и рассеивалась в Космосе путем теплового излучения. В результате температура в недрах растущей планеты повсеместно оставалась ниже температуры плавления недифференцированного первичного земного вещества, и сама Земля была еще недифференцированной планетой, лишенной ядра и земной коры.

Для понимания дальнейших путей развития Земли исключительно важны два основных вывода теории планетообразования: во-первых, молодая Земля сразу же после образования была относительно холодным космическим телом, и в ее недрах температура не превышала температуры плавления земного вещества; во-вторых, первичная Земля имела достаточно однородный состав.

Если принять эти условия за исходные, то дальнейшая эволюция Земли (ее мантии, ядра, коры, гидросферы и атмосферы) полностью определяется изначальным составом земного вещества, теплозапасом нашей планеты и историей ее взаимодействия с Луной.

Поскольку в крипотектоническую (катархейскую) эпоху земное вещество нигде не плавилось, то не могли тогда развиваться и процессы дегазации Земли. Именно по этой причине следует ожидать, что в течение первых 600 млн лет жизни нашей планеты на ее поверхности полностью отсутствовала гидросфера, а молодая атмосфера была, как и у первичной Земли, исключительно разреженной и состояла в основном из благородных газов.

Таким образом, первичное (первозданное) состояние Земли продолжалось приблизительно 600 млн лет, прежде чем она перешла на главную последовательность развития планет земной группы.

Возникновение жизни

Возникновение жизни связано с началом дегазации Земли. Первая жизнь на Земле зародилась в пропитанном водой и элементоорганическими соединениями первозданном (вулканическом) грунте где-то около 4 млрд лет назад. Зарождение жизни, как предполагается, совпало с первым и наиболее сильным тектоническим и геохимическим рубежом в истории развития Земли — началом дифференциации земного вещества, приведшей к началу формирования гидросферы, атмосферы и континентальной земной коры.

Эра явной жизни начинается в фанерозое (550–600 млн последних лет). Разумеется, фанерозой эра явной жизни представляет собой лишь последний, наиболее близкий к нам период органической эволюции, которая происходила более 3,5 млрд лет. В развитии жизни на Земле наблюдается достаточно четкая этапность, выражающаяся в наличии рубежей различных рангов, которые установлены по значительному обновлению органического мира. Граница докембрия и кембрия (570 млн лет) фиксируется появлением многих скелетных форм беспозвоночных и известковых водорослей, а на границе кембрия и ордовика (490 млн лет) произошло существенное увеличение систематического состава беспозвоночных. В конце ордовика и в силуре растения начинают завоевывать сушу; конец силура ознаменовался появлением первых настоящих рыб (акантоды), а на суше — первых высших растений — примитивных риниофитов. Поздний палеозой по своему органическому миру отличается от раннего богатством и разнообразием как животных, так и растений; пышный расцвет наземной растительности, появление и развитие сухопутных позвоночных — важные особенности позднего палеозоя, который, возможно, даже следует рассматривать как крупный метазойский этап развития жизни.

Переход от метазоя к мезозою — одна из наиболее существенных перестроек органического мира, в первую очередь животного. На границе перми и триаса почти целиком закончили свое существование четырехлучевые кораллы, трилобиты, табуляты, гониатиты, фузулиниды, и появились новые группы гастропод и

двустворок, а также рептилий; последние, как известно, преобладали в наземной фауне мезозоя. В морской фауне мезозоя было господство белемноидей, аммоноидей и ругоз.

Важный рубеж в эволюции жизни на Земле соответствует границе мела и палеогена. Большое количество групп животных вымирает или почти вымирает (аммоноидеи, белемноидеи, рудисты, а также динозавры, ихтиозавры и некоторые другие пресмыкающиеся), появляются новые моллюски, особенно много новых групп млекопитающих.

Велико значение этого рубежа и в развитии флоры, особенно покрытосеменных. Около 50% всех родов, существовавших в позднем мелу, вымерли на границе мела и палеогена, при этом многие характерные для мелового периода фаунистические группы вымерли еще до начала датского века. Наличие таких резких рубежей в эволюции жизни привело некоторых палеонтологов к мысли о том, что вряд ли такую этапность можно объяснить только эволюционными факторами в условиях Земли, и заставило этих исследователей попытаться искать в Космосе главные причины крупной этапности в развитии земной жизни.

Антропогенное воздействие

Энергия солнечного излучения, действие гравитационных, электромагнитных полей, различные космические факторы, а также воздействие атмосферы, гидросферы и биосферы на земную поверхность приводят к проявлению на поверхности, и в частности, в почвах целого комплекса процессов преобразования и перемещения вещества.

Создавшиеся на поверхности Земли условия оказались благоприятными для образования и существования такой специфической формы материи, как живое вещество. Основой для существования живого вещества является особый поверхностный слой земной коры — почва. Живые организмы активно взаимодействуют с окружающей их средой, в том числе и с почвой. Разлагаясь, органическое вещество приносит в почву активные химические реагенты. Вообще живые организмы, продукты их жизнедеятельности, органические остатки являются одним из наиболее мощных экзогенных факторов разрушения и преобразования горных пород и воздействия на почвы.

Область взаимодействия живых организмов с элементами неживой природы, как известно, называется биосферой. Человек, появившийся на определенной стадии развития планеты, наследует все, присущее живому организму — избирательно захватывает из окружающей среды вещества, преобразует их и

возвращает в измененном виде. Интенсивное развитие цивилизации, в особенности техногенеза, как процесса геологической деятельности человека, повлекло многократное усиление взаимодействия человека с окружающей средой за счет привлечения для удовлетворения потребностей человека технических средств. В конечном счете это привело к тому, что роль человека в эволюции планеты вышла за рамки биологического вида.

Биосфера и ноосфера Земли

Анализ изложенных выше основных данных о Земле, ее внутреннем строении и эволюции и их сопоставление с тем, что известно об окружающем нас Космосе, показывают, что Земля является уникальной, единственной пригодной для жизни планетой не только в Солнечной системе, но и в окрестностях Солнца, которые простираются на десятки и сотни световых лет. Лик Земли, ее континенты и океаны, горы, впадины и равнины сформировались в результате сложных процессов конвекции в верхней и нижней мантии. И даже конвекция в ядре Земли оказывает влияние на мощные извержения раскаленных магм в различных точках земной поверхности. Эти процессы осуществляются в основном за счет тепловой энергии Земли, которая выделялась при гравитационном сжатии и распаде радиоактивных веществ. И в настоящее время Земля является активно эволюционирующей планетой. На определенном этапе развития Земли произошло образование океана и атмосферы.

Вода и газы содержались в твердых веществах, которые образовывали тело Земли на ранних этапах ее эволюции. В результате нагрева Земли пары воды и газы поднимались к поверхности и выходили на нее в процессе извержений магм, вулканической деятельности, а также в виде горячих источников и газовых фонтанов. Все это привело к образованию первичных океана и атмосферы.

Эволюция нашей планеты происходила таким образом, что после образования земной коры создались условия для возникновения и развития органической и в конце концов разумной жизни. Жизнь живых существ связана с определенной геологической оболочкой нашей планеты — биосферой. В. И. Вернадский впервые высказал следующее соображение: под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние — «ноосферу» — сферу человеческого разума.

В связи с увеличивающейся в последние десятилетия опасностью негативного антропогенного воздействия на биосферу, которое может привести даже к ее уничтожению, рассмотрим

несколько подробнее фундаментальные свойства биосферы и ноосферы в свете трудов академика В. И. Вернадского.

В начале XX столетия людей на Земле было в три раза меньше, чем в наше время, а ресурсов природы было намного больше, чем сейчас, и казалось, что они беспредельны и нужно было думать только о том, как их лучше взять и использовать. Об их охране или рациональном использовании не было и речи.

Однако, как написано в прекрасной статье о ноосфере В. И. Вернадского выдающимся ученым-геологом А. Л. Яншиным и Ф. Т. Яншиной, уже в начале XIX в. были гениальные ученые, которые, думая о перспективах взаимоотношений человечества и природы, приходили к неутешительным выводам.

Например, великий французский натуралист Жан Батист Ламарк в 1803 г. в трактате «Философия зоологии» писал: «Можно, пожалуй, сказать, что назначение человека как бы заключается в том, чтобы уничтожить свой род, предварительно сделав земной шар не пригодным для обитания».

Были и выступления других ученых разных стран, призывающие к бережному отношению к природе. В России первым обратил на это внимание основатель современного почвоведения В. В. Докучаев. В своей книге «Наши степи прежде и теперь» он показал, что антропогенное воздействие привело к усилению засух, снижению плодородия почвенного слоя и ряду других негативных последствий.

Выдающийся вклад в изучение влияния человеческой деятельности на окружающую природную среду внес наш гениальный ученый Владимир Иванович Вернадский.

В 1927 г. В. И. Вернадский приходит к потрясающему выводу о том, что деятельность человека становится самым мощным геологическим и геохимическим фактором, более мощным, чем все природные процессы вместе взятые.

Для совокупности всех организмов (включая микроскопические), обитающих на Земле, В. И. Вернадский ввел термин «живое вещество», состав которого обусловлен всеми химическими, физическими и энергетическими процессами, которые происходят в той оболочке земного шара, в которой существует «живое вещество», т. е. в биосфере. Термин «биосфера» для этой оболочки Земли предложил в 1873 г. австрийский геолог Эдуард Зюсс. Он же ввел такие ныне широко используемые термины, как «гидросфера», «литосфера».

В. И. Вернадский нашел термин «биосфера» удачным, принял его и в многочисленных публикациях разработал целое учение о биосфере Земли. Он определил размеры биосферы,

включив в нее гидросферу, нижнюю часть атмосферы до высоты 30 км, на которой еще встречаются поднятые ветром насекомые и уже летали в это время самолеты, и верхнюю часть литосферы до глубины 2–3 км, до которой проникают поверхностные воды с бактериями. Он определил общую массу живого вещества биосферы, вычислил количество космической энергии, которое поглощается биосферой в результате улавливания солнечных лучей хлорофиллом зеленых растений, определил, какая часть этой энергии переходит в энергию движения, размножения и другие функции самого живого вещества, а какая захороняется вместе с органическим веществом, проникая в глубь земной коры, и скапливается в конечном счете в виде месторождений горючих ископаемых. Необходимо отметить, что хотя масса живого вещества пренебрежимо мала по сравнению с массой атмосферы, гидросферы и земной коры (отношение массы атмосферы к массе живого вещества биосферы составляет примерно 2000, отношение массы гидросферы к массе живого вещества биосферы составляет примерно 600 000, отношение массы земной коры более 15 000 000), биосфера за период в 100–200 млн лет производит количество живого вещества, равное массе земной коры.

В. И. Вернадский определил скорость распространения жизни в биосфере и установил, что она обратно пропорциональна величине организмов, разработал математический метод определения давления различных видов живого вещества на окружающую среду, установил циклы прохождения через живое вещество биосферы углерода, азота и других химических элементов.

Деятельность человечества, приводящую к изменению природных условий, В. И. Вернадский вначале рассматривал как процесс, чуждый биосфере. Однако с середины 30-х г. по мере накопления научных данных о свойствах биосферы и о характере человеческой деятельности, он стал рассматривать последнюю как закономерный этап эволюционного развития биосферы.

В. И. Вернадский считал, что обязательно должно наступить время, когда человечество станет более разумно относиться к окружающей его природной среде, и эволюция биосферы будет происходить как по природным законам, так и под сильным влиянием просвещенного человеческого разума.

Для геологической оболочки Земли, включающей биосферу и преобразующейся под влиянием разумной деятельности человечества, Э. Леруа, Тейяр де Шарден и В. И. Вернадский ввели термин «ноосфера», т. е. сфера человеческого разума.

Можно ли считать, что в конце XX в. уже сформировалась ноосфера или она еще находится в процессе формирования? Если обратиться к трудам самого В. И. Вернадского, то в его трудах, согласно Ф. Т. Яншиной, сформулированы следующие условия, выполнение которых необходимо для становления ноосферы:

1. Заселение человеком всей планеты.
2. Пресобразование средств связи и обмена между разными странами.
3. Усиление связей, в том числе политических, между всеми государствами Земли.
4. Преобладание геологической роли человеческой деятельности над природными геологическими процессами, протекающими в ноосфере.
5. Расширение границ биосферы и выход в Космос.
6. Открытие новых источников энергии.
7. Равенство людей всех рас и религий.
8. Увеличение роли народных масс в решении вопросов внутренней и внешней политики.
9. Создание в общественном и государственном строе условий, благоприятных для свободы научной мысли и научного искания.
10. Подъем условий жизни населения. Недопущение нищеты, недоедания и голода. Общедоступность здравоохранения.
11. Разумное преобразование первичной природы Земли с целью сделать ее способной удовлетворить все материальные, эстетические и духовные потребности численно возрастающего человечества.
12. Исключение войн из жизни общества.

Анализ этих условий, сформулированных В. И. Вернадским более 50 лет назад, показывает, что многие из них либо выполнены, либо находятся в стадии выполнения. Наиболее далеки от реализации, к сожалению, условия 7, 8, и 12.

В последние десятилетия большое развитие получила деятельность, направленная на защиту и сохранение природы, на формирование оптимального отношения человека к природе, при котором сохранялись бы все виды животного и растительного мира и удовлетворялись потребности человечества. К этому направлению деятельности относится и широко развернувшееся в мире экологическое движение, включающее в себя научные исследования экологических проблем с позиций разных областей знаний.

Труды В. И. Вернадского, посвященные биосфере и ноосфере, практически не интересовали его современников. Отношение общества к этой части творчества В. И. Вернадского резко изменилось начиная с 70-х годов XX столетия. К этому времени начавшийся в послевоенные годы бурный рост численности населения земного шара, сопутствующее ему быстрое истощение природных ресурсов и рост загрязнения окружающей среды заставили задуматься ученых и государственных деятелей над способами решения острых проблем дальнейшего существования и развития земной цивилизации.

В 1968 г. итальянский экономист А. Печчеи пригласил в Рим более 100 известных ученых из разных стран для обсуждения вопросов о будущем человечества. Эти встречи трансформировались в международную организацию, получившую название Римского клуба.

В июне 1972 г. Организация объединенных наций созвала в Стокгольме Первую Международную конференцию по окружающей среде и развитию, в которой участвовали делегации из 106 стран. Конференция констатировала не только истощение природных ресурсов (во многих странах даже запасов пресной воды), но и вредное воздействие загрязнения окружающей среды на состояние здоровья больших человеческих популяций. Участники конференции обратились к правительствам всех стран мира с призывом немедленно создать государственные органы охраны природы от истребления и антропогенного загрязнения.

Многие страны, в том числе и СССР, откликнулись на этот призыв. Однако для всякой практической работы нужна теоретическая основа. В 70-е, особенно в 80-е годы, многим ученым стало ясно, что фундаментальной базой научной разработки новых отношений человека к окружающей его природной среде является учение В. И. Вернадского о биосфере и ноосфере. К настоящему времени опубликовано большое количество научных трудов и проведено много конференций, посвященных проблемам биосферы и ноосферы. Ряд конференций специально был

посвящен вопросам ноосферного развития человечества, или ноосферогенеза.

В июне 1992 г. Рио-де-Жанейро состоялась Вторая Международная конференция ООН по окружающей среде и устойчивому развитию. В конференции участвовали представители 180 государств на уровне глав правительств или их полномочных представителей.

Конференция приняла ряд основополагающих документов по обеспечению устойчивого развития мирового сообщества. В главном из этих документов «Программа действий. Повестка дня на XXI век» отмечается, что для перехода человечества на путь устойчивого развития необходимо: более тесное экономическое и политическое объединение государств при сохранении культурных традиций их народов; равенство людей всех рас и религий, увеличение роли народных масс в управлении государствами, прекращение войн и вооруженных конфликтов, расширение обитаемых территорий Земли и освоение космического пространства, открытие и использование новых мощных источников энергии и т. д.

Нетрудно видеть, что предлагается стремиться к созданию тех условий на Земле, которые согласно учению В. И. Вернадского, необходимы для формирования ноосферы.

Широко развернувшись в мире экологические исследования должны найти ответ на вопрос: как обеспечить сохранение пригодной для жизни человека окружающей среды? Что является главной опасностью для нормального существования человечества?

На этот вопрос у ученых пока нет однозначного ответа. Если наибольший вред окружающей среде наносит антропогенное воздействие, связанное с неправильным ведением производственной деятельности, то главной проблемой экологии будет установление возможностей построения такой экономики, при которой не будет существенного отрицательного влияния на окружающую среду. Если же окажется, что сообщества естественных видов растительного и животного мира полностью определяют и поддерживают состояние окружающей среды, то основной задачей экологических исследований будет изыскание способов такого ведения экономической деятельности, при котором не превышался бы порог допустимых возмущений биосферы, и, соответственно, научно обоснованное установление этого порога.

Во многих трудах (например, [35]) утверждается, что существует природная биологическая регуляция окружающей среды,

и сохранение последней возможно только при сохранении полноценной жизнедеятельности биосферы. В настоящее время под биосферой понимают биоту (термин, объединяющий фауну и флору) и окружающую среду в глобальных масштабах. В биосферу входит и внешняя среда, в которой нет живых организмов, но которая влияет на биотическую среду.

Окружающая среда прежде всего характеризуется концентрациями химических соединений, необходимыми для поддержания жизнедеятельности биоты. Организмам, разлагающим органические вещества (бактерии, грибы, животные), необходимы определенные количества органических веществ и кислорода, а для синтезирующих органические вещества растений, соответственно, необходимы углекислый газ, различные химические соединения азота, фосфора и многих других элементов. Концентрации этих соединений называются абиогенами.

Изменения концентраций абиогенов могут происходить в результате геофизических процессов и в результате жизнедеятельности самой биоты. Концентрации неорганических абиогенов за счет геофизических процессов могут изменяться на 100% за время порядка 10^5 лет. За время существования жизни ($\sim 10^9$ лет) концентрации абиогенов могли бы измениться так сильно, что существование любой жизни было бы невозможно. Окружающая среда на Земле могла бы перейти в состояние, подобное поверхностной среде других планет Солнечной системы.

В связи с этим следует признать, что регулировку концентраций абиогенов производит биота. Конечно, биота не может изменить такие природные параметры, как поток солнечной радиации за пределами атмосферы, скорость вращения Земли, величины приливов и отливов и т. п. Однако неблагоприятные изменения и случайные флуктуации жизненно важных характеристик окружающей среды биота может компенсировать путем направленного изменения управляемых ею концентраций абиогенов. Например, неорганический углерод, поступающий из недр Земли, компенсируется потоком углерода в осадочные породы.

Существуют надежные данные, что глобальные среднегодовые потоки биологического синтеза и разложения органических веществ совпадают с относительной точностью порядка 10^{-4} . Это говорит о том, что естественная биота Земли устроена таким образом, что способна с высочайшей точностью поддерживать пригодное для жизни состояние окружающей среды.

Согласно В. Г. Горшкову, при полном нарушении скоррелированного взаимодействия видов в естественных сообществах биоты окружающая среда может полностью исказиться (на 100%) за

десятки лет. Если же вся биота будет уничтожена, то искажение окружающей среды на 100% за счет геофизических процессов произойдет только за сотни тысяч лет.

Начиная по крайней мере с начала XX столетия биота суши перестала поглощать избыток углерода из атмосферы, наоборот, она стала выбрасывать углерод в атмосферу, увеличивая загрязнение окружающей среды, производимое промышленными предприятиями. Это означает, что структура естественной биоты суши нарушена в глобальных масштабах. Что касается всей биосферы, можно констатировать, что ее современное частично загрязненное состояние обратимо, она может вернуться в прежнее устойчивое состояние при сокращении антропогенного загрязнения на порядок величины. Другого устойчивого состояния биосферы не существует, и при сохранении или ускорении темпов возмущения биосферы устойчивость окружающей среды будет разрушена.

Отсюда следует, что ноосфера как экологическая ниша устойчивого существования и развития цивилизованного человека при паличии эконоомико-технологической деятельности возможна только при сохранении достаточного количества биоты на большой территории планеты.

Таким образом, главное природное противостояние, связанное с существованием и развитием жизни на Земле, осуществляется между геофизическими процессами, возмущающими биосферу, и биотой, компенсирующей эти возмущения. Отсюда ясна роль фундаментальных исследований в области экологической геофизики. Глубокое изучение проблем экологической геофизики расширит возможности поисков выхода из экологического кризиса, обусловленного неконтролируемым антропогенным воздействием на окружающую среду.

Важнейшей проблемой для человечества является определение условий устойчивости биосферы. Сначала напомним, как проблема устойчивости решается в термодинамике. В изолированной системе энтропия при неравновесных процессах будет возрастать. После прекращения этих процессов наступает устойчивое равновесие, при котором энтропия системы будет максимальной и равна S_0 . Общим условием устойчивого равновесия изолированной системы является максимальность энтропии. В неравновесном состоянии система имеет энтропию, равную S , причем

$$\Delta S = S - S_0 < 0.$$

Так как S_0 — максимальное значение энтропии, то в равновесии первая вариация энтропии $\delta S = 0$, а вторая вариация $\delta^2 S < 0$. Эти условия определяют необходимое и достаточное условия равновесия изолированной системы.

Принцип Ле Шателье–Брауна определяет общие условия устойчивого равновесия термодинамических систем. Он был установлен Ле Шателье в 1884 г. и обоснован в 1887 г. Брауном. Согласно этому принципу внешнее воздействие, выводящее систему из состояния равновесия, вызывает в этой системе такие процессы, которые ослабляют эти воздействия. Принцип Ле Шателье–Брауна является термодинамическим аналогом хорошо знакомого закона электромагнитной индукции и обобщает его. Он позволяет предсказать направление, в котором под влиянием внешнего воздействия изменятся термодинамические процессы, протекающие в системе. Однако принцип Ле Шателье–Брауна не позволяет дать количественных заключений о поведении системы. Принципом Ле Шателье–Брауна обуславливается устойчивость равновесного состояния. Если бы всякий первичный процесс усиливался еще больше благодаря вызванному им вторичному процессу, то это вывело бы систему из равновесия. Наличие устойчивого равновесия у системы является необходимым условием применимости принципа Ле Шателье–Брауна.

На основе того, что биота поддерживает определенный химический состав окружающей среды следует, что биота подчиняется принципу Ле Шателье–Брауна. При возникновении внешних возмущений, нарушающих равновесное состояние биосферы, в ней возникают внутренние процессы, компенсирующие это внешнее воздействие. Сейчас много говорится об избыточной величине CO_2 в атмосфере. Для биосферы принцип Ле Шателье–Брауна выражается в том, что скорость поглощения углерода биотой пропорциональна приросту концентрации углерода по отношению к невозмущенному состоянию. На основе анализа выбросов ископаемого углерода и накопления его в атмосфере показано, что в биосфере принцип Ле Шателье–Брауна выполнялся до начала XX века. С начала XX века биота суши перестала поглощать избыток углерода в атмосфере. Однако большинство ученых считает, что современное состояние биосферы обратимо, при уменьшении антропогенного воздействия биосфера может еще вернуться в устойчивое состояние.

Структура биосферы

Биосферу, как место обитания организмов вместе с самими организмами, можно разделить на три подсферы: аэробIOSферу, гидробиосферу, геобиосферу.

АэробIOSфера населена аэробиионтами. Факторами, определяющими возможность существования в ней живых объектов, являются наличие капель воды, аэрозолей, положительные температуры. АэробIOSфера подразделяется на тропобиосферу, альтобиосферу, парабIOSферу.

Гидробиосфера включает в себя всю воду планеты за исключением подземных вод. Обитатели гидробиосферы — гидробионты. Гидробиосфера включает в себя континентальные воды (аквабиосфера), моря (маринобиосфера). Маринобиосфера, в свою очередь, подразделяется на фотосферу, дистосферу (в которую поступает менее 1 солнечной энергии), афотосферу (нет света). Маринобиосфера подразделяется на части в зависимости от характера протекания в ней физического процесса — распределения световой энергии по глубине.

Геобиосфера подразделяется на следующие подсферы: террабиосферу, гипотеррабиосферу, теллуриобиосферу, гиобиосферу, метабиосферу. Подробное описание этих подсфер можно найти в учебниках по экологии, например в [15, 123].

Биосфера имеет сложную структуру, в ней функционируют достаточно обособленные системы, так называемые экосистемы или биогеоценозы, включающие в себя сообщества живых организмов и их среду обитания. В биосфере именно благодаря деятельности экосистем происходит поглощение солнечной энергии, ее трансформация, с помощью экосистем преобразуется вещество Земли.

Биогеоценоз (экосистема) является важнейшим элементом биосферы, основным функциональным элементом. Экосистема объединяет все организмы, обитающие на данной территории. Взаимодействие биотического сообщества со средой образует биотические структуры, круговорот вещества между живой и неживой частью экосистемы. Понятие биогеоценоза возникло в 30-е годы XX века. Английский геоботаник Тэнсли определил биогеоценоз как целостное образование в биосфере, в котором организмы и неорганические факторы выступают компонентами в относительно устойчивом состоянии.

Важнейшими свойствами биосферы являются потоки энергии и вещества. Интенсивность обмена веществ и энергии внутри и вне биогеоценоза позволяет установить их границы, отделить один биогеоценоз от другого. Экосистема, как следует из общей

теории систем, обладает общими свойствами сложных систем, такими как эмерджентность, устойчивость, эволюция и др. Под эмерджентностью понимается несводимость свойств системы к свойствам составляющих ее элементов, то есть свойства системы зависят не только от свойств составляющих ее элементов, но и от особенностей взаимодействия между элементами. Устойчивость системы определяется преобладанием энергии внутренних взаимодействий частей над внешним воздействием. В противном случае в системе могут произойти необратимые изменения.

Учитывая важность понятия биогеоценоза, приведем еще одно определение, принадлежащее нашему соотечественнику В. И. Сукачеву: «Биогеоценоз — участок земной поверхности, где на известном протяжении биоценоз и отвечающие ему участки атмосферы, литосферы, гидросферы, педосферы (почвы) остаются однородными, тесно связанными между собой и поэтому образуют в совокупности единый взаимообусловленный комплекс».

Биоценоз представляет собой биологическую систему, которая является совокупностью популяций различных видов растений, животных и микроорганизмов, обитающих на определенной территории. Биоценоз включает в себя фитоценоз, зооценоз, микробиоценоз. Таким образом, биогеоценоз представляет собой единое целое биоценоза и его среды обитания — биотопа, причем биоценоз играет важную роль в формировании, создании среды своего обитания.

Все биогеоценозы имеют одинаковую структуру. С трофической (от греческого *trophe* — питание) точки зрения структура экосистемы включает два уровня: верхний — автотрофный (самостоятельно питающийся), нижний — гетеротрофный (питаемый за счет других). В основе каждого биогеоценоза лежат автотрофные организмы или продуценты — это растения, которые в процессе фотосинтеза создают органические соединения. (Необходимо отметить существование биогеоценозов, в основе которых лежит хемосинтез. Такие системы, в частности, распространены на океанских глубинах и характеризуются очень высокой биопродуктивностью.) Далее в экосистеме энергия по пищевой (трофической) цепи передается гетеротрофным организмам — это растительноядные животные. На третьем трофическом уровне находятся уже плотоядные животные. Отмершие организмы, растения разлагаются сапротрофами, которые также называются редуцентами, на минеральные вещества, в дальнейшем используемые для питания растений. Эти минеральные вещества называются субстратами цикла, наряду с которыми

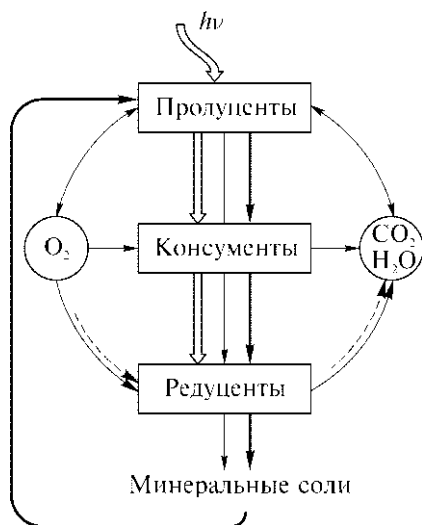


Рис. 17.1. Структура экосистемы, включающая поток энергии (двойная контурная стрелка) и два круговорота веществ: твердых (толстая стрелка) и газообразных (тонкая стрелка). Тонкой прерывистой стрелкой показано участие в круговороте анаэробных бактерий

существуют внешние субстраты, поступающие из внешней среды в экосистему. Сапротрофы подразделяются на сапрофиты (растения) и сапрофаги (живые организмы). Схема экосистемы приведена на рис. 17.1.

Энергия, вещество в пределах экосистемы передается с одного трофического уровня на другой. С каждого трофического уровня на следующий передается только небольшая часть энергии или вещества. Структура уровней энергии и вещества образует так называемые пирамиды Эльтона. Имеются различные категории экологических пирамид: пирамида чисел — определяет число особей на каждом уровне пищевой цепи; пирамида биомассы — определяет количество органического вещества на каждом уровне, пирамида энергий — устанавливает количество используемой энергии на каждом уровне. Высота пирамиды определяется длиной пищевой цепи. Чем длиннее пищевая цепь, тем меньшее значение по биомассе, числу особей или потребляемой энергии имеют плотоядные на вершине пирамиды. В учебниках по экологии приведено множество примеров, иллюстрирующих свойства экологических пирамид [15, 110, 123].

Рассмотрим некоторые энергетические характеристики экосистем. Валовая первичная продукция P — это количество органического вещества, возникшего в процессе фотосинтеза. В валовую первичную продукцию включается часть, которая расходуется на дыхание биомассы R . Чистая первичная продукция

равна

$$P_N = P - R.$$

Коэффициент эффективности фотосинтеза равен отношению чистой первичной продукции к валовой:

$$K = \frac{P - R}{P}.$$

Важными характеристиками являются отношения $\frac{P}{B}$ и $\frac{P_N}{B}$, где B — энергия биомассы. Например, для фитопланктона годовая продукция во много раз превышает B , для леса $\frac{P}{B}$ много меньше единицы, для поля однолетних трав $\frac{P}{B}$ приблизительно равно единице. Вторичная продукция представляет собой накопления органического вещества на уровне консументов. В зависимости от уровня вторичная продукция обозначается как $P_2, P_3, P_4, \dots$. Чистая продукция сообщества (наличная биомасса или урожай на корню) равна $P_N - (P_2 + P_3 + P_4 + \dots)$. Все указанные характеристики выражаются в единицах массы или энергии, приходящейся на единицу площади и времени. В качестве меры термодинамической упорядоченности для экосистем используется отношение $\frac{R}{B}$ энергии R , расходуемой на дыхание, к энергии, заключенной в биомассе B .

Энергия и биомасса органического вещества при переходе с одной экологической ступени на другую уменьшаются, однако для некоторых веществ наблюдается обратная картина — происходит их концентрация при переходе на высшие ступени. Это явление определяется правилом биологического усиления. Например, концентрация пестицидов, попавших в морской залив, возрастает по мере передачи по цепочке: планктон — планктонофаги — рыбы — водоплавающие птицы.

Экологические факторы

Под экологическим фактором понимается воздействие определенного рода на биоценоз экосистемы или его элементы. Реакция живого организма или биоценоза экосистемы на действие фактора называется адаптацией или приспособлением. К экологическим факторам относятся:

- питательные элементы;

- почва и ее состав;
- температура;
- электромагнитное излучение (свет);
- вода;
- скорость течения в воде и ветра в атмосфере;
- влажность.

Наряду с этими факторами в каждом конкретном случае могут быть названы и другие факторы, учитывающие специфику экосистемы. Необходимо указать, что значительное число экологических факторов имеет физическую природу. Многие особенности воздействия физических факторов на элементы экосистемы не исследованы. Физические процессы в биосфере, действие которых на экосистемы описывается в виде экологических факторов, также требуют дальнейших исследований. Экологические факторы физической природы также могут быть отнесены к сфере интересов физической экологии.

Совокупность факторов, обеспечивающих устойчивое существование того или иного вида животных или растений, называется экологической нишей. Другими словами экологическая ниша — это совокупность условий жизни внутри экосистемы, предъявляемых к ней тем или иным видом. Экологические факторы подразделяются на абиотические, связанные с неживой природой, например, свет, и биотические, определяемые взаимодействием различных живых организмов друг на друга (рис. 17.2). По характеру действия экологические факторы подразделяются на факторы избирательного действия, общего

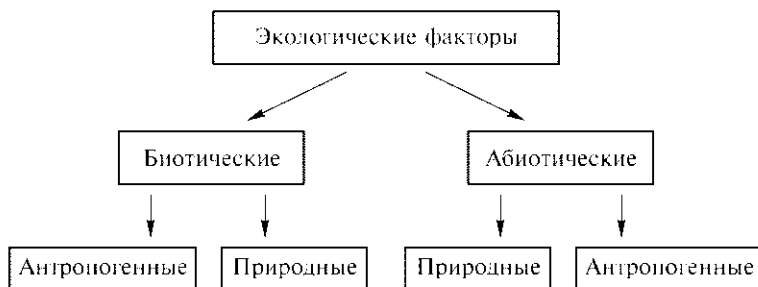


Рис. 17.2. Классификация экологических факторов

действия, периодические и непериодические. Значительная часть абиотических факторов имеет геофизическую природу (температура, влажность, скорость ветра и т. д.).

Наряду с изложенной выше традиционной классификацией экологических факторов, существуют и другие способы их классификации. Исходя из способа влияния экологических факторов на живые организмы все экологические факторы могут быть подразделены на витальные, или энергетические, и сигнальные. Экологические факторы первой группы непосредственно оказывают влияние на жизнедеятельность организмов. Экологические факторы второй группы несут информацию об изменении энергетических параметров. Некоторые факторы обладают как энергетическим, так и сигнальным действием, например, свет. К первой группе экологических факторов может быть отнесена температура, ко второй группе — продолжительность светового дня.

Существует классификация экологических факторов, в основу которой положена оценка реакции организма на воздействие этих факторов. В этой классификации экологические факторы подразделяются на следующие группы:

- первичные периодические факторы;
- вторичные периодические факторы;
- непериодические факторы.

К первичным периодическим факторам относятся температура, освещенность, уровень воды в приливной зоне моря. Первичные периодические факторы определяют площади ареала видов. Изменение вторичных факторов обусловлено действием первичных факторов. Например, влажность, растительность относятся ко второй группе факторов. Вторичные периодические факторы оказывают влияние на численность видов в пределах их ареалов. Действие непериодических факторов оказывает влияние на численность особей на данной территории.

Действие экологического фактора сказывается в той или иной форме на условиях жизнедеятельности организмов. При изменении интенсивности экологического фактора в определенных пределах создаются оптимальные условия существования того или иного вида. Наряду с этим интервалом оптимальных условий существует интервал значений экологического фактора, в котором вид может существовать. При выходе значений экологического фактора за эти пределы, условия существования нарушаются,

численность вида уменьшается. Экологическая толерантность охватывает диапазон значений экологического фактора от нижнего предела существования вида до верхнего предела. Закон толерантности Шелфорда устанавливает лимитирующую роль максимального и минимального значений экологического фактора. В качестве примера описанных свойств, можно напомнить о реакции обитателей морских или пресноводных водоемов на изменение солености. Живой организм может иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного фактора и узкий — в отношении другого. Наиболее распространены организмы с широким диапазоном толерантности по отношению к наибольшему числу экологических факторов. Диапазон толерантности меняется по мере развития организма.

Любой фактор, приближающийся к пределу толерантности, называется лимитирующим фактором. В 1840 г. Либих сформулировал принцип, названный позднее законом минимума Либиха, который звучит так: веществом, находящимся в минимуме, управляется урожай и определяется величина и устойчивость урожая во времени. Либих сформулировал свой закон лишь для химических элементов (питательных веществ).

Ясно, что для развития живых организмов важны и другие экологические факторы. Закон лимитирующих факторов рассматривает влияние всех факторов на биоценоз экосистемы, согласно ему любой экологический фактор, находящийся в минимуме, определяет состояние биоценоза.

В процессе развития экосистемы происходит последовательная смена природных сообществ экосистемы, изменение среды обитания или биотопа. Этот процесс называется экологической сукцессией. Различают первичную и вторичную сукцессию. Первичная сукцессия начинается на участке, который не был занят перед заселением каким-либо сообществом. Вторичная сукцессия развивается на площади, с которой было предварительно удалено ранее существовавшее сообщество. Примером первичной сукцессии может служить развитие экосистемы на острове, возникшем в результате подводного извержения вулкана. Примером вторичной сукцессии может служить развитие экосистемы на вырубке леса или заброшенном поле. Вторичная сукцессия протекает обычно более быстро, так как в этом случае территория более благоприятна для развития сообщества, на ней имеются уже некоторые организмы. Наглядным примером сукцессии в водной среде является развитие искусственного водоема.

Кульминацией развития экосистемы является формирование зрелой или климаксной экосистемы, для которой характерна

максимальная биомасса. Зрелая экосистема обладает максимальной устойчивостью, способностью стабилизировать некоторые физические факторы окружающей среды, противостоять внешним воздействиям и сохранять состояние равновесия.

Наряду с естественными экосистемами существуют искусственные экосистемы, которые характеризуются значительно меньшим видовым разнообразием и обычно используются на ранних стадиях развития. Искусственные системы широко используются в сельском хозяйстве. Эти системы получают дополнительное количество энергии при обработке почвы в виде удобрений, пестицидов. Доминирующие виды растений и животных в агроэкосистемах получены путем искусственного, а не естественного отбора, как это имеет место в природных системах. В настоящее время под агроэкосистемами занято около 30% площади суши, из которых пахотные земли занимают 10%, под пастбища используются 20%.

Морские экосистемы

В качестве примера рассмотрим более подробно морские экосистемы. Морские организмы оказывают сильное влияние на среду обитания, в частности формируя химический состав морской воды, донные отложения. С другой стороны геофизические процессы оказывают огромное влияние на функционирование морских организмов и их сообществ. Поэтому познание законов океана возможно путем комплексного изучения гидрофизических и биологических процессов, протекающих в океане.

Морские организмы являются неотъемлемой частью морской экосистемы, в которой все организмы связаны между собой и зависят от физических и химических условий окружающей среды. Морские организмы, как все другие живые организмы, живут, синтезируя органические соединения, обмениваясь веществом и энергией с окружающей средой. Изучение потоков вещества и энергии в морской экосистеме является главной экологической задачей океанологии.

Для морских организмов характерно сильное разнообразие размеров, форм и способов существования. Число видов, обитающих в океане, примерно на порядок меньше числа видов, обитающих на суше. Это обусловлено большим разнообразием экологических условий на суше. Однако в океане встречаются виды, не существующие на суше, например, бурые и красные водоросли, иглокожие, щетинкочелюстные и другие.

По виду используемых источников энергии все морские организмы подразделяются на два типа: автотрофные и гетеротрофные организмы. Автотрофные организмы не поедают другие организмы, они потребляют неорганические соединения. Синтез углеводов и других соединений в автотрофных организмах происходит с помощью процессов фотосинтеза или хемосинтеза.

Только через эти процессы неорганические вещества вовлекаются в живые организмы. Основную роль играет фотосинтез, так как с его помощью создается основная масса органических соединений в океане. В реакции фотосинтеза углекислый газ, вода и энергия солнечного света создают сахар, воду и кислород, энергия в химической форме запасается в молекуле сахара.

Реакция фотосинтеза может протекать только в некоторых типах морских организмов (водоросли, травы, диатомеи, некоторые жгутиковые и др.).

В процессе хемосинтеза сахар образуется из углекислого газа и сероводорода. Энергия, необходимая для этой реакции, черпается из некоторых химических соединений, например, сероводорода, в процессе их окисления. На океанском дне около так называемых «черных» и «белых» курильщиков возникают удивительные сообщества морских организмов, в основе которых лежат органические вещества, возникающие именно в процессе хемосинтеза. Хемотрофы могут использовать не только сероводород, но и азот и сульфат. Изучение морских сообществ, возникающих на основе хемотрофных процессов, представляет значительный практический интерес, поскольку подобные системы, в принципе, могут быть созданы на суше искусственно для утилизации вредных веществ.

Кроме фотосинтеза и хемосинтеза в живых организмах протекают разнообразные процессы вторичного синтеза, в ходе которых создаются более крупные и сложные органические вещества.

Гетеротрофы потребляют в пищу либо живые, либо мертвые ткани других организмов. Эта органика обеспечивает химической энергией гетеротрофные организмы для осуществления реакций вторичного фотосинтеза.

Поскольку основная часть органики на планете (и в океане) образуется в процессе фотосинтеза, можно сказать, что жизнь на Земле основана на энергии солнечного света, которая удерживается биосферой благодаря фотосинтезу и в химической форме переносится в составе пищи по трофической цепи от одного организма к другому.

Разделение морских организмов на автотрофные и гетеротрофные производится по источникам и методам получения

энергии. Можно провести разделение морских организмов по их местообитанию. Существуют два основных места обитания морских организмов: морское дно, или бентическая зона, и вода над дном, или пелагическая зона. Организмы, обитающие в бентической зоне, называются бентосом. Бентос подразделяется на эпибионты, обитающие на поверхности дна, и эндобионты, обитающие в донных отложениях.

Организмы, обитающие в пелагической зоне, подразделяются на нектон (активно перемещающиеся организмы) и планктон (пассивно перемещающиеся организмы). Планктон подразделяется на фитопланктон (растительный) и зоопланктон (животный).

Это разделение в значительной мере условно. Например, многие виды морских животных изменяют образ жизни на протяжении жизненного цикла. Взрослые особи некоторых видов животных могут вести различный образ жизни. Например, омары ползают по поверхности морского дна и плавают над ним. Подобные животные относятся к нектобентическим животным.

Как уже говорилось, важнейшим свойством экосистем является перенос энергии и вещества. Простейшая модель экосистемы, демонстрирующая это свойство, имеет следующий вид, приведенный на рис. 17.3.

Как видно из схемы, солнечная энергия, поглощаемая растениями, передается от них животным и бактериям по пищевой цепи в виде химической энергии. Животные и бактерии обмениваются с растениями углекислым газом и минеральными питательными веществами. Поток органических веществ замкнут в том смысле, что между компонентами системы циркулируют одни и те же вещества, входящие в эту систему и пополняемые из океана. Поток энергии односторонен, вся приходящая энергия рассеивается, в конце концов, в виде тепла в результате механических и химических процессов. Необходимо уточнить, что биотические составляющие экосистемы содержат живое и мертвое вещество. Биогенные остатки (органический детрит) составляют значительную часть всего вещества морской части биосферы. Основными потребителями детрита являются донные жители. Растения, образующие органику в результате фотосинтеза, называются первичными продуцентами, а общее количество вещества, образующееся при этом за какой-либо определенный отрезок времени называется валовой первичной продукцией. По способу питания выделяют 5 типов организмов: растительноядные; плотоядные (хищные); питающиеся падалью или трупоеды; питающиеся органическим детритом и, наконец, разлагающие

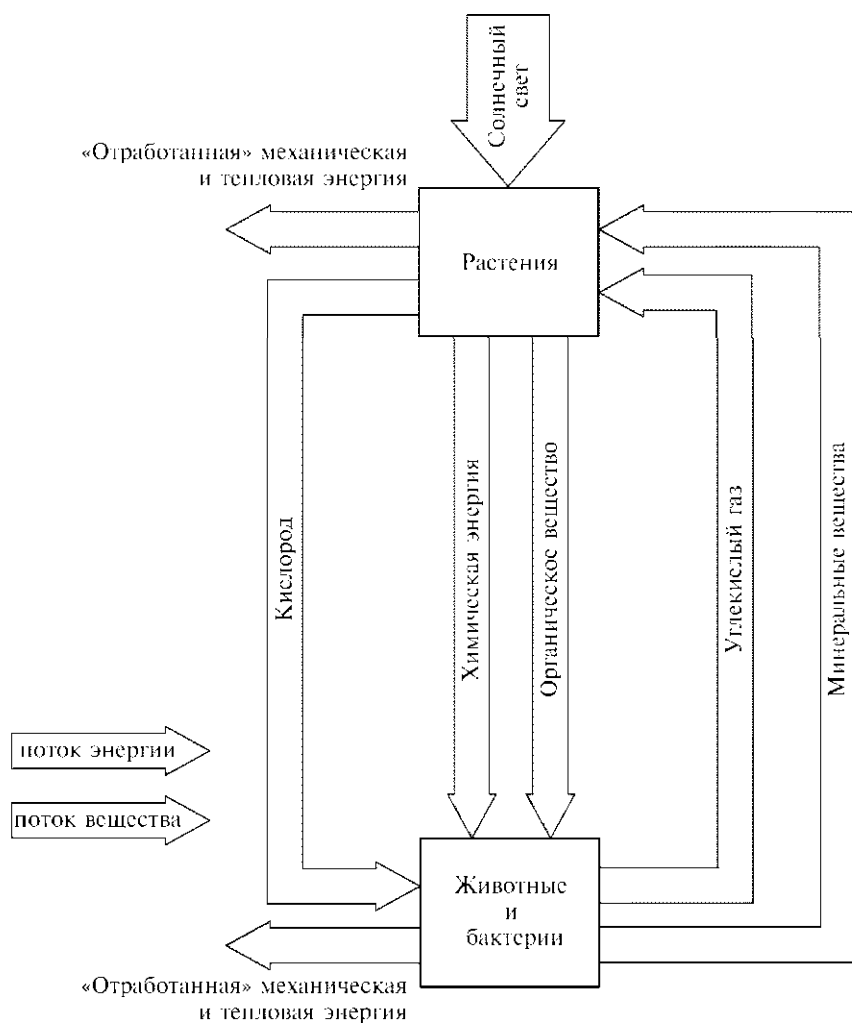


Рис. 17.3. Упрощенная модель потоков энергии и вещества в морской экосистеме

мертвые органические вещества (редуценты) на минеральные вещества.

В процессе регенерации питательных веществ морские организмы-редуценты превращают сложные органические вещества в более простые, которые усваиваются растениями из воды. Биологическое взаимодействие между организмами, связанное с потреблением пищи, называется трофическим. Органическое

вещество передается по трофическим уровням начиная с первого, на котором фитопланктон образует валовую первичную продукцию. Второй трофический уровень образуется растительным зоопланктоном, продукция зоопланктона называется вторичной. Хищники 1 ранга, поедающие зоопланктон, формируют следующий трофический уровень и создают органическое вещество, называемое третичной продукцией. Далее следуют хищники более высоких рангов. Замыкают систему по питательным веществам процессы бактериального разложения (опосредованная регенерация) и обменные процессы, протекающие в организмах растений и животных (прямая регенерация). Основные звенья трофической цепи изображены на рис. 17.4. Описанная схема трофических уровней является приближенной. С учетом реальности более правильно говорить не о пищевой цепи, а о пищевой сети. В этом случае на различных трофических уровнях находятся несколько различных организмов, и обмен веществ идет между организмами различных уровней. В этом случае появляются перекрестные трофические связи, образуется трофическая сеть. Экологическая эффективность трофического уровня определяется величиной энергии, передаваемой на следующий трофический уровень. В общем случае величина продукции, поступающей на какой-либо уровень, определяется произведением первичной продукции на экологическую эффективность всех предшествующих уровней. Значения экологической эффективности трофических уровней довольно низки, порядка 0,1, поэтому на высшие трофические уровни поступает относительно мало энергии.

В морской экосистеме пространственная организация потоков энергии и вещества имеет важную особенность. Зона, в которой протекает фотосинтез, расположена у поверхности океана, а в глубинных слоях фотосинтез отсутствует. В эти слои отсутствия фотосинтеза, которые отделены от зоны фотосинтеза значительным расстоянием, энергия поступает в химической форме. Перенос энергии в глубинные слои происходит по пищевой цепи и из-за оседания органического детрита.

Таким образом, возникает поток питательных веществ от поверхностных слоев, направленный в глубь океана. Если бы не существовали противоположные процессы, то верхний слой океана очень быстро лишился бы питательных веществ, и жизнь в океане прекратилась. Обратное поступление питательных веществ в поверхностные воды океана происходит вследствие нескольких физических процессов, прежде всего апвеллинга, экваториального подъема вод, подъема вод в высоких широтах при разрушении

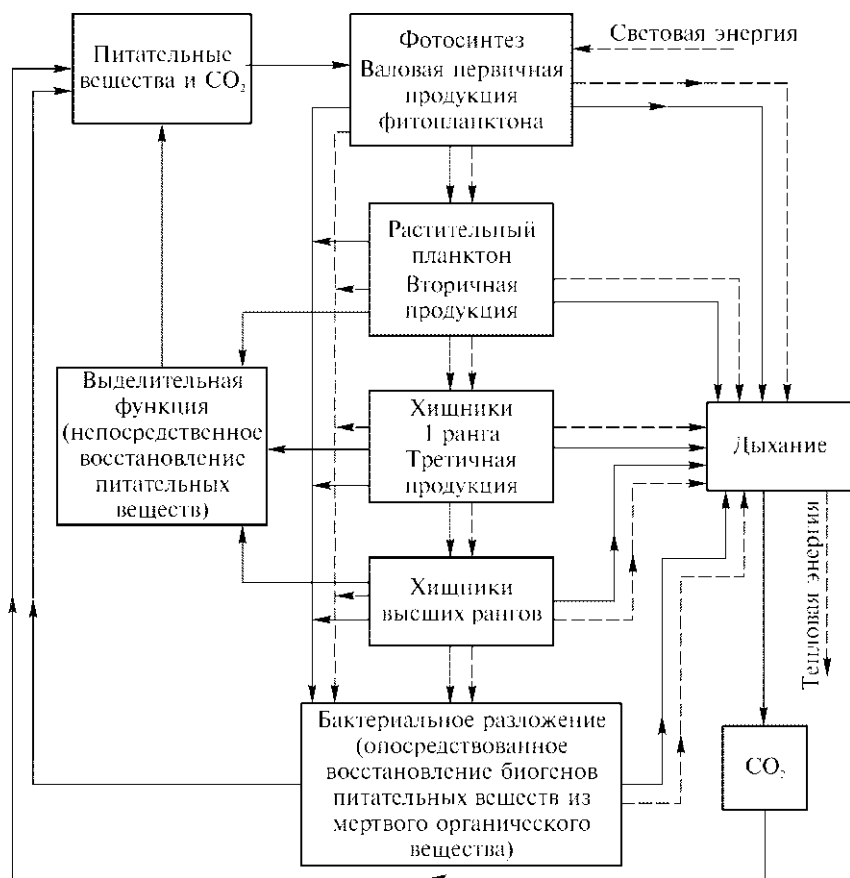


Рис. 17.4. Потoki энергии (пунктир) и углеродосодержащих соединений в морской экосистеме. Резервуары вещества и процессы показаны в виде прямоугольников, обведенных жирной и светлой линиями соответственно

сезонного термоклина вследствие конвекции. В некоторых прибрежных районах Мирового океана интенсивность апвеллинга особенно велика. Высокая концентрация питательных веществ создает благоприятные условия для развития фитопланктона и других организмов. Именно эти районы Мирового океана являются наиболее продуктивными.

Параметры морских экосистем значительно меняются в пространстве и во времени. Установленный запас, или биомасса,

Таблица 17.1. Продуктивность экосистемы Северного моря [44]

Солнечная энергия, поступающая на поверхность моря, — 250000 ккал/м ² · год	
Уровень продуктивности	ккал/м ² · год
валовая первичная продукция	500
чистая первичная продукция	350
растительные организмы	56
хищники третьего уровня	5
пелагические рыбы	0,14
демерсальные рыбы	0,25

определяют величину биомассы некоторых определенных организмов или суммарную биомассу всех организмов. В зависимости от целей исследования установленный запас выражается в виде числа особей на единицу площади (или объема) или в виде массы на единицу площади (или объема).

Как уже говорилось, общее количество вещества, образующееся при фотосинтезе за определенный отрезок времени, называется валовой первичной продукцией. Часть первичной продукции используется растениями в качестве источника энергии. Разница между валовой первичной продукцией и частью органического вещества, используемого растениями, называется чистой первичной продукцией, она доступна для потребления организмами более высоких трофических уровней. В табл. 17.1 приведены данные о продуктивности Северного моря. Суммарный общий улов рыбы содержит менее 0,1% величины энергии в валовой первичной продукции. Этот удивительный, на первый взгляд, факт объясняется большой потерей энергии на каждом уровне пищевой цепи и большим числом трофических уровней между первым трофическим уровнем и уровнем, продукция которого используется людьми, в данном случае рыбой. Отношение чистой первичной продукции к установленному запасу называется константой скорости обновления, которая показывает сколько раз в год происходит смена популяции.

Величина продукции морской экосистемы в значительной мере зависит от величины продукции первичного трофического уровня. Перечислим факторы, влияющие на продуктивность первичного трофического уровня. Это освещенность верхнего слоя океана, температура воды, наличие питательных веществ, скорость выедания растительных организмов. Интенсивность

солнечной радиации определяется географическими и метеорологическими условиями. С глубиной интенсивность солнечного излучения очень быстро падает. На глубине 10 м для фотосинтеза доступно 10% энергии, поступающей на водную поверхность. На глубине 100 м для фотосинтеза доступен лишь 1% энергии. Поэтому зона фотосинтеза ограничена несколькими десятками метров. В шельфовых водах, где содержится больше взвешенных веществ, чем в открытом океане, поглощение света в верхнем слое воды еще больше, и толщина слоя фотосинтеза еще меньше. Температура воды также сильно влияет на производство первичной продукции. Скорость фотосинтеза максимальна (при прочих равных условиях) в определенном интервале температур. Для большинства районов океана температура воды оказывается ниже температуры этого оптимума для многих видов морских организмов. Поэтому сезонный прогрев воды приводит к увеличению скорости фотосинтеза.

Помимо воды и углекислого газа для развития растений необходимы питательные вещества (биогены). В океане к основным питательным веществам относятся азот, фосфор, кремний. Азот и фосфор необходимы для построения клеток. Фосфор участвует в энергетических процессах обмена веществ. В растениях соотношение «азот/фосфор» составляет примерно 10 : 1. В ряде прибрежных районов фосфор выступает как лимитирующий фотосинтез элемент. Много потребляют фосфора две группы фитопланктонных организмов — диатомеи и динофлагелляты. Быстрое извлечение кремния из воды при строительстве ими своих скелетов создает нехватку кремния и ограничивает их развитие.

Выедание фитопланктона зоопланктоном сказывается на величине первичной продукции. Поэтому интенсивность выедания является одним из важнейших факторов, определяющих величину первичной продукции.

Продуктивность морских вод сильно изменяется в пространстве. Высокая продуктивность характерна для шельфовых вод, зон апвеллинга, где происходит интенсивное обогащение поверхностных вод питательными веществами. Очень высокой продуктивностью характеризуются районы интенсивного прибрежного апвеллинга у берегов Перу, Орегона, Сенегала и Юго-Западной Африки.

Высокая продуктивность отмечена в зонах пограничных течений, где имеет место хорошее перемешивание водных масс. Высокая продуктивность шельфов обусловлена тем, что в них вода содержит относительно много питательных веществ из-за

речного стока, поступления биогенных веществ из донных осадков (благодаря относительной близости дна), лучшего освещения и относительной теплоты водных масс. В открытом океане площадь районов с высокой продуктивностью незначительна, так как огромные участки океана занимают антициклонические круговороты, в которых происходит опускание поверхностных вод.

В высоких широтах (выше 50°) происходит разрушение сезонного термоклина с конвективным перемешиванием водных масс. В приполярных областях океана имеет место восходящее движение глубинных масс. Поэтому эти широты океана относятся к высокопродуктивным районам. По мере дальнейшего продвижения к полюсам продуктивность начинает падать из-за понижения температуры воды и уменьшения ее освещенности. Для океана характерна не только пространственная изменчивость продуктивности, но и повсеместная сезонная изменчивость. Сезонная изменчивость продуктивности обусловлена в значительной мере реакцией фитопланктона на сезонные изменения условий среды обитания, прежде всего освещенности и температуры. Наибольшая сезонная контрастность наблюдается в умеренной зоне океана.

В заключение раздела приведем некоторые сведения о продуктах питания, получаемых человеком из океана. Океан занимает около 71% площади поверхности планеты, получает значительно большую часть солнечной энергии, чем суша, однако вклад океана в питание человека составляет около 1%. С другой стороны, океан является важным источником получения животных белков — примерно 5–10% их потребляемого количества поступает из океана. Многие районы океана по величине общей годовой первичной продукции не уступают суше. Однако общая низкая величина продукции, получаемой из океана, объясняется тем, что человек использует в пищу морские организмы, находящиеся на верхних трофических уровнях. Районы, богатые в промысловом отношении, совпадают с участками океана с высокой первичной продуктивностью. По величине первичной продуктивности в океане можно выделить три зоны: зона открытого океана, прибрежная зона, зона апвеллинга. Зоны апвеллинга примерно в шесть раз продуктивнее зоны открытого океана. Прибрежная зона занимает по продуктивности промежуточное положение. В табл. 17.2 приведены характеристики этих зон океана. Так как площадь зоны апвеллинга и прибрежной зоны много меньше площади зоны открытого океана, их общая продуктивность меньше продуктивности зон апвеллинга и прибрежной зоны. Однако число трофических уровней между уровнем первичных

Таблица 17.2. Подразделение океана на провинции в зависимости от уровня первичной продуктивности [44]

Провинция	Процент от общей площади океана	Площадь, км ²	Средняя продуктивность на единицу площади, гС/м ² · год	Общая продуктивность, 10 ⁹ тС/год
открытый океан	90	326 · 10 ⁶	50	16
прибрежная зона*	9,9	36 · 10 ⁶	100	3,6
районы апвеллинга	0,1	3,6 · 10 ⁵	300	0,1
всего				20,0

* Включая удаленные от берега участки высокой продуктивности.

продуцентов и уровнем промысловых рыб и ракообразных в этих зонах существенно различаются (табл. 17.3). Если в открытом океане пищевые цепи, заканчивающиеся промысловыми рыбами, содержат в среднем 5 трофических уровней, то в зоне апвеллинга таких уровней один-два. Именно этим объясняется высокая рыбопродуктивность зон апвеллинга. Прибрежные зоны, значительно превосходящие по площади зоны апвеллинга, имеют

Таблица 17.3. Расчетная продукция рыбы в трех океанических провинциях [44]

Провинция	Первичная продукция (тонны органического углерода)	Число трофических уровней выше первого	Эффективность, %	Продукция рыбы (тонны живого веса)
открытый океан	16,3 · 10 ⁹	5	10	0,16 · 10 ⁷
прибрежная зона	3,6 · 10 ⁹	3	15	12 · 10 ⁷
районы апвеллинга	0,1 · 10 ⁹	1,5	20	12 · 10 ⁷
всего	20,0 · 10 ⁹			24 · 10 ⁷

примерно равную с ними рыбопродуктивность. Это объясняется большим числом трофических уровней между уровнем первичных продуцентов и уровнем промысловых рыб в прибрежной зоне, чем в зонах апвеллинга.

Описание эволюции простейших экосистем

Рассмотрим некоторые классические задачи экологии или эволюционной биологии, успешно применяемые для описания численности видов в экосистеме [5, 29, 115]. Понятие вида отпосится к одному из главнейших в биологии. К числу основных характеристик вида относятся способность особей вида к скрещиванию и сохранению этой способности у потомства, внешнее сходство индивидов, подобные взаимодействия с биотой и абиотической средой. Особи одного вида, обитающие на определенной территории, образуют популяции. Популяция — это сложившаяся устойчивая совокупность особей одного вида, характеризующаяся определенными внутренними связями, относительно однородными условиями местообитания. Популяции, обитающие на общей территории, образуют сообщества.

Рассмотрим сначала развитие популяции одного вида. Если в замкнутой системе имеется популяция только одного вида с числом особей x и количество пищи ограничено, то изменение числа особей во времени t описывается уравнением Фергюльста (или логистическим уравнением):

$$\frac{dx}{dt} = ex - hx^2.$$

Член ex описывает прирост за счет превышения рождаемости над смертностью. Член hx^2 описывает внутривидовую конкуренцию из-за пищи, места и т. п. Решение уравнения Фергюльста имеет вид:

$$x(t) = \frac{x_0 x_s}{x_0 + (x_s - x_0) \exp(-et)}.$$

Эта функция выражает рост популяции от начальной численности x_0 до насыщения $x_s = \frac{e}{h}$.

Если $h \ll e$ и количество пищи не ограничено, наблюдается экспоненциальный рост числа особей популяции (закон Мальтуса):

$$x(t) = x_0 \exp(et).$$

Эта первая модель, описывающая численность популяции, была предложена Т. Мальтусом еще в конце XVIII в. для описания процесса изменения численности населения. Так как условия неограниченности ресурсов в природе не наблюдаются, или наблюдаются на ограниченных временных интервалах и территориях, модель Мальтуса является приближенной. Т. Мальтус показал ее применимость для анализа динамики популяций колонистов Северной Америки. Закон Мальтуса хорошо описывает динамику искусственных систем, развитие популяций на начальном этапе, пока численность популяций невелика.

В логистическом уравнении член, описывающий прирост популяции, пропорционален численности популяции. Это верно только в случае бесполового размножения, например, для микроорганизмов. В случае разнополой популяции для неограниченных ресурсов скорость размножения определяется числом встреч самцов и самок и квадратично зависит от числа особей:

$$\frac{dx}{dt} = rx^2.$$

В случае больших плотностей популяции скорость размножения ограничивается не числом встреч самцов и самок, а числом самок в популяции. Таким образом уравнение, определяющее скорость изменения численности популяции, принимает вид:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x}.$$

Если численность популяции x упадет ниже некоторой критической величины, при котором среднее время, в течение которого происходит оплодотворение, становится больше среднего времени, в течение которого особь сохраняет способность к размножению, то произойдет гибель популяции. Учет этого эффекта можно провести, включив в предыдущее уравнение член вида $-\gamma x$, т. е. смертность пропорциональна численности особей:

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x} - \gamma x.$$

Стационарные решения $\left(\frac{dx}{dt} = 0\right)$ этого уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0, \\ x_2 &= \frac{\gamma\beta}{\alpha\beta - \gamma\tau} = n. \end{aligned}$$

Первое решение устойчиво, второе — нет, т. е. при $x < n$ популяция вырождается, ее численность стремится к нулю. При $x > n$ численность популяции растет неограниченно.

Реальные популяции в природных условиях должны быть ограничены по численности и сверху — в случае больших плотностей популяций скорость размножения падает из-за внутривидовой конкуренции. Уравнение, описывающее динамику разнородной популяции при учете ограниченности популяции сверху и снизу, имеет вид

$$\frac{dx}{dt} = \alpha \frac{\beta x^2}{\beta + \tau x} - \gamma x - \sigma x^2.$$

Данное уравнение имеет уже три стационарных решения:

$$x_1 = 0,$$

$$x_2 = n,$$

$$x_3 = k.$$

Первое и третье решения являются устойчивыми, второе — нет. В зависимости от начальных значений численности популяции, популяция либо вырождается (если начальная численность меньше n), либо при начальной численности, большей n , развивается и достигает максимального значения, равного k . На рис. 17.5 показаны зависимость численности популяции от времени и зависимость скорости роста популяции от численности популяции [115].

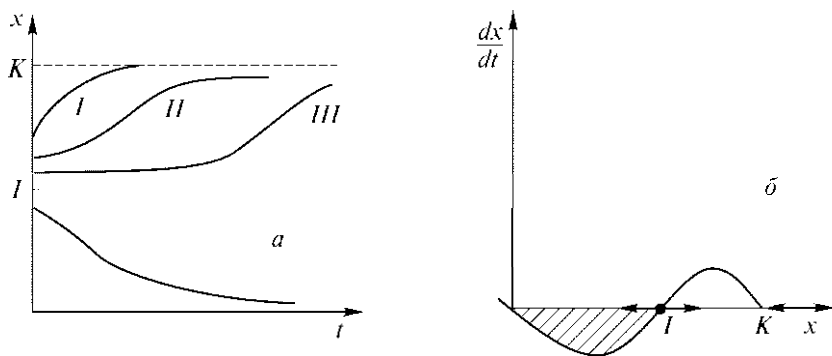


Рис. 17.5. Зависимость численности популяции от времени (а) и скорости роста популяции от ее численности (б). Штриховкой обозначена область вырождения популяции

Учет возрастной структуры особей, входящих в популяцию, употребления ядов, вырабатываемых в процессе жизнедеятельности, приводит к изменению зависимости $x(t)$ в этом случае возможны колебания численности особей, уменьшение числа особей и гибель популяции в случае накопления ядов.

Более интересные решения получаются в случае системы, в которой имеются два или более взаимодействующих вида [5, 115]. К этому случаю относится и известная задача о взаимодействии в системе хищник–жертва, описанная А. Лоткой и В. Вольтера. Пусть в системе имеются жертвы, например зайцы, число особей которых равно x . Пища у зайцев имеется в неограниченном количестве. Число хищников, например рысей, в системе y , они питаются только зайцами. Уравнения, описывающие изменения численности популяций зайцев и рысей, имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k_1 x - kxy, \\ \frac{dy}{dt} &= k_3 xy - k_2 y.\end{aligned}$$

Множитель k_1 описывает размножение жертв, k — их убыль в результате взаимодействия с хищниками, k_3 — размножение, а k_2 — убыль хищников.

Система находится в стационарном состоянии при $\frac{dx}{dt} = 0$, $\frac{dy}{dt} = 0$. В этом случае она принимает вид

$$\begin{aligned}k_1 x - kxy &= 0, \\ k_2 y &= 0\end{aligned}$$

и имеет решения

$$x = 0, \quad y = 0$$

и

$$x_0 = \frac{k_2}{k_3}, \quad y_0 = \frac{k_1}{k}.$$

Состояние системы хищник–жертва удобно изображать на плоскости xy (аналогия фазовой плоскости координата–скорость или координата импульс). На плоскости xy траектории, описывающие развитие системы во времени, имеют вид замкнутых кривых вокруг стационарных точек x_0, y_0 .

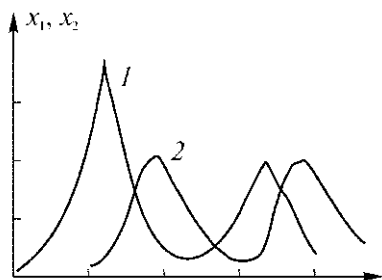


Рис. 17.6. Циклические колебания в системе хищник–жертва на примере двух инфузорий: 1 — *paramecium caudatum* (жертва) и 2 — *ditinium nasutum* (хищник)

Разделив второе уравнение системы на первое, получим уравнение

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y(k_3x - k_2)}{x(k_1 - ky)}.$$

Это уравнение с разделяющимися переменными имеет общий интеграл

$$k_3x - k_2 \ln x + ky - k_1 \ln y = \text{const},$$

где const — константа, период движения вокруг стационарной точки определяется следующим образом:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{k_1 k_2}}.$$

Численность популяций x , y испытывает периодические колебания с периодом T , смещенные по фазе [5] (рис.17.6). Средние значения равны x_0 , y_0 . Колебательные изменения численности популяций в подобной системе хорошо известно по результатам натуральных наблюдений. Внешнее возмущение, воздействующее на систему, может перевести ее на другую траекторию движения вокруг стационарной точки, колебания численности хищников y и жертв x будут происходить при этом с другими амплитудами.

Эволюция популяций вблизи стационарного состояния в случае равномерного и пропорционального изменения численности видов (отлов, охота)

$$dx = ax \, dt,$$

$$dy = by \, dt$$

может быть описана следующей системой уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = (k_1 - a)x - kxy,$$

$$\frac{dy}{dt} = k_3xy - (k_2 + b)y.$$

Если $k_1 - a > 0$, характер решений не изменится, но средние (стационарные) состояния будут другие:

$$x_0 = \frac{k_3 + b}{k_3},$$

$$y_0 = \frac{k - a}{k}.$$

Полученное изменение численности x_0 , y_0 выражает известный результат, так называемый закон изменения средних: если два вида истребляются равномерно и пропорционально их численности, то среднее число особей жертв возрастает, а число особей хищников убывает. Данный закон имеет многочисленные подтверждения в природе.

Модель хищник–жертва Лотки–Вольтера справедлива только при низких концентрациях взаимодействующих популяций, для перехода к реальным системам важен также учет ограниченности пищи у жертв, однако сдвиги по фазе колебаний числа жертв и хищников сохраняются и в этих случаях.

Для улучшения модели можно учесть самоограничение роста популяций путем добавления членов пропорциональных квадрату численности видов:

$$\frac{dx}{dt} = k_1x - kxy - \gamma_1x^2,$$

$$\frac{dy}{dt} = k_3xy - k_2y - \gamma_2y^2.$$

Члены с γ_1 и γ_2 отражают внутривидовую конкуренцию. Даже добавка небольших нелинейных членов может вызвать качественное изменение процессов в системе. Например, на фазовой плоскости xy возможен переход от особой точки типа «центр» к особой точке типа «фокус» или «узел».

Учет пространственного перемещения жертв и хищников обычно производится путем включения в модель диффузионных

членов, описывающих случайные блуждания особей. В этом случае система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= k_1 x - kxy + D_1 \frac{\partial^2 x}{\partial r^2}, \\ \frac{dy}{dt} &= k_3 xy - k_2 y + D_2 \frac{\partial^2 y}{\partial r^2}.\end{aligned}$$

В этих формулах D_1 и D_2 — коэффициенты миграции особей в пределах ареала распространения. Если ареал ограничен, качественная картина изменения численности популяций сохраняется. Однако если ареал не ограничен, то возможно возникновение решений типа волн. Важным свойством пространственного поведения системы хищник–жертва является возникновение пространственных неоднородностей плотности распределения особей — так называемых диссипативных структур. Таким образом, если в точечных моделях наблюдаются автоколебательные режимы, то в пространственно распределенных системах имеют место диссипативные структуры.

Наряду с взаимодействиями типа хищник–жертва существуют и другие виды парных взаимодействий:

Нейтрализм — название не требует пояснений.

Аменсализм — в этом случае один вид препятствует развитию другого, а обратное влияние отсутствует.

Комменсализм — при этом виде взаимодействий один вид положительно воздействует на второй, при этом первый вид влияния второго не испытывает.

Конкуренция — два вида влияют друг на друга отрицательно.

Мутуализм — два вида влияют друг на друга положительно.

Типы парных межвидовых взаимодействий приведены в табл. 17.4.

Несмотря на простоту, изложенные выше модели описывают некоторые важнейшие черты простейших экосистем. Приведем один пример из недалекого прошлого. В 1987 г. в Черном море были обнаружены отдельные экземпляры гребневика мнемииопсиса. Гребневик мнемииопсис обитает в лагунах на Атлантическом побережье США. Численность его в этих естественных условиях

Таблица 17.4. Типы парных межвидовых взаимодействий

Тип взаимодействия	Влияние первого вида на второй	Влияние второго вида на первый
хищник–жертва	–1	+1
аменсализм	–1	0
комменсализм	+1	0
конкуренция	–1	–1
мутуализм	+1	+1
нейтрализм	0	0

ограничена. Вероятно в Черное море он был завезен случайно с балластными водами судов. В Черном море у него нет естественных врагов, подобных тем, которые водятся в лагунах Атлантического побережья. Гребневик оказался на одном трофическом уровне с медузой аурелией и одержал победу в конкурентной борьбе. За 2–3 года плотность медуз в Черном море уменьшилась почти в 10 раз, уменьшились и средние размеры медуз примерно в 4–6 раз. Общая масса мнемииопсиса достигла 900 млн т, что в 10 раз превышает весь годовой улов в море. Но гребневик нанес удар не только медузам, уничтожение зоопланктона гребневи́ком привело к сокращению пищевой базы промысловых рыб и других обитателей моря. В результате резко упал вылов промысловых рыб — хамсы, тюльки, шпрот и др.

Такая ситуация продолжалась до 1999 г. В 1999 г. произошла инвазия в Черное море нового гребневика — берое. Предположительно гребневик берое попал с теплыми водами из Средиземноморского бассейна или был завезен подобно мнемииопсису с балластными водами. Гребневик берое питается гребневи́ком мнемииопсис. Внедрение и развитие берое привело к резкому уменьшению биомассы мнемииопсиса и, как следствие, к росту зоопланктона и личинок рыб, а позднее и запасов пелагических рыб. Массовое развитие берое в Черном море привело к снижению трофического пресса мнемииопсиса на планктонное сообщество. Парное существование гребневи́ков в других морских бассейнах Мирового океана обеспечивает природное равновесие их численности. Например, у берегов Америки в Атлантическом океане обитают *Mnemiopsis leidyi* и *Beroe cissinnis*, уничтожающий первый вид. Таким образом, в Черном море после инвазии

гребневика берое развивается ситуация, подобная существующим в других регионах океана.

Подобные явления наблюдаются во многих водных бассейнах. В Финском заливе в последнее время резко возросло число «пришельцев». Появление рачка церкопагиса привело к падению улова рыбы. В реке Вуокса обнаружен китайский мохноногий краб, в Копорской губе дрейссена. Все это является следствием неконтролируемого выпуска балластных вод. Планируемое расширение судоходства, связанное со строительством новых портов, может нанести непоправимый вред экосистеме Финского залива.

Рассмотрим математическую модель этой системы, соответствующий тип парного межвидового взаимодействия — конкуренция. Пусть общая масса медуз M_1 , а масса гребневика M_2 . Общий запас пищи M_0 . Тогда систему уравнений, описывающую изменение масс M_1 и M_2 , можно записать в виде:

$$\frac{dM_1}{dt} = \gamma_1 M_1 M_0 - \varepsilon_1 M_1,$$

$$\frac{dM_2}{dt} = \gamma_2 M_2 M_0 - \varepsilon_2 M_2.$$

Члены $\varepsilon_1 M_1$ и $\varepsilon_2 M_2$ описывают убыль видов M_1 и M_2 соответственно. Разделим первое уравнение на $\gamma_1 M_1 M_0$, второе — на $\gamma_2 M_2 M_0$, вычтем второе уравнение из первого и проинтегрируем. В результате получим:

$$\frac{M_1^{1/\gamma_1}}{M_2^{1/\gamma_2}} = \text{const} \exp\left(\frac{\varepsilon_2}{\gamma_2} - \frac{\varepsilon_1}{\gamma_1}\right).$$

Если $\frac{\varepsilon_2}{\gamma_2} > \frac{\varepsilon_1}{\gamma_1}$, то M_1 будет расти, а M_2 уменьшаться. Если $\frac{\varepsilon_1}{\gamma_1} > \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2}$, то с ростом времени преобладать будет масса M_2 , а M_1 будет стремиться к нулю. Именно этот последний случай реализуется в системе медуза аурелия — гребневик мнемиионсис (рис. 17.7). Гребневик, как имеющий меньшую смертность и потребляющий большее количество пищи, почти полностью вытеснил медузу аурелию. Вместе с тем, мы получили известную теорию Вольтера: если виды живут в одной экологической пище, то одни из них всегда вытесняют остальные.

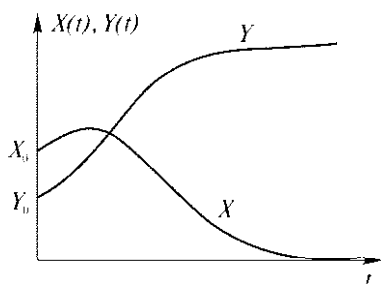


Рис. 17.7. Эволюция популяций двух видов в условиях конкуренции: X — медуза аурелия, Y — гребневик мнемипсис

Новые понятия экологии

Новое понятие экологии возникло на основе теории систем, термодинамики открытых систем и является наиболее физическим [29, 132]. Такое определение восходит к работам А. А. Богданова и В. И. Вернадского. Богданов в начале XX века высказал мысль о том, что законы организации должны действовать не только в живой, но и в неживой природе. Наличие структур, организованность — это важнейшие черты природы. Вернадский, развивая свое учение о биосфере и ноосфере, использовал понятие организованности для обозначения важнейшего свойства материальных и энергетических частей биосферы.

На основе подобных представлений экологию можно определить как науку об организации и эволюции биосферных систем разных уровней сложности (в том числе всей биосферы), изучающую связи и превращения в таких системах. Проблемы экологии заключаются в установлении причин и условий возникновения и развития биосферных систем различного уровня сложности, изучения устойчивости этих систем.

В связи с развитием термодинамики открытых систем, изучением процессов самоорганизации в неравновесных системах стали понятными физические причины самоорганизации в живой и неживой природе. Элементы или системы живой и неживой природы являются открытыми термодинамическими системами, далекими от состояния равновесия, их пронизывают потоки энергии и вещества, и поэтому в них и происходят процессы структуризации, самоорганизации. Таким образом, самоорганизация систем в природе базируется на фундаментальных физических принципах.

Основные научные результаты, полученные в термодинамике во второй половине XX в., представляют значительный интерес, так как приводят к выводам, которые совершенно по новому описывают строение мира и место человека в нем. К создателям современной термодинамики относятся, прежде всего, Л. Онзагер

(нобелевский лауреат 1968 г.) и И. Пригожин (нобелевский лауреат 1977 г.). Напомним основные положения классической термодинамики и дадим краткие сведения о важнейших положениях пелинейной неравновесной термодинамики.

Основным объектом изучения классической термодинамики являются изолированные системы. Система называется изолированной, если она не обменивается с внешними телами ни энергией, ни веществом (в том числе и излучением). В классической термодинамике постулируется, что изолированная система с течением времени перейдет в состояние термодинамического равновесия, причем она никогда самопроизвольно из этого состояния выйти не сможет. Состояние системы, при котором термодинамические параметры (например, температура T , давление P), определяющие ее состояние, не зависят от времени, называется состоянием термодинамического равновесия.

К основным понятиям классической термодинамики относится представление о равновесном процессе, при котором все параметры системы изменяются бесконечно медленно, так что все время система находится в равновесных состояниях.

Важнейшим параметром, характеризующим состояние термодинамической системы, является температура. Часто утверждение о существовании температуры называется нулевым началом (законом) термодинамики.

Первый закон (начало) термодинамики утверждает, что количество теплоты δQ , сообщенное системе, идет на изменение ее внутренней энергии dU и на совершение работы системой δA :

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Второй закон термодинамики определяет направление протекания процессов в замкнутой системе. Одна из формулировок второго начала определяет изменение во времени энтропии S в замкнутой системе:

$$dS \geq 0.$$

В замкнутой системе энтропия S не убывает, оставаясь постоянной в обратимых процессах, и возрастает в необратимых. В открытых системах изменение энтропии не имеет определенного знака, оно может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от теплообмена и обмена веществом системы с окружающим пространством.

Из неравенства Клаузиуса–Карно

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}$$

следует, что подвод тепла увеличивает беспорядок, а отвод тепла (уменьшение энтропии) увеличивает порядок. Образование структур при отводе тепла является общим свойством материи. Хорошо известным примером повышения упорядоченности является переход тел в кристаллическое состояние при охлаждении. На Земле реализуется другой способ экспорта энтропии — тепло отводится Землей при более низкой температуре, чем подводится к ней. Энтропия системы может уменьшаться, если экспорт энтропии в единицу времени из системы dS_e превышает производство энтропии внутри системы dS_i :

$$dS < 0, \quad \text{если } |dS_e| > dS_i \geq 0.$$

Согласно третьему закону термодинамики при стремлении температуры системы к абсолютному нулю ее энтропия также стремится к нулю.

Основные законы классической термодинамики являются обобщением эмпирически установленных связей, статистическая физика служит теоретическим основанием классической термодинамики. Она устанавливает физическую природу термодинамических параметров, которые являются средними значениями микроскопических параметров системы.

Согласно статистической физике энтропия S пропорциональна логарифму термодинамической вероятности W (термодинамическая вероятность W — это число различных микросостояний, которыми может быть реализовано данное макросостояние):

$$S = k \ln W,$$

где k — постоянная Больцмана.

Как уже говорилось, основные законы классической термодинамики касаются изолированных систем. Большинство природных систем, в частности, в биосфере, и вся биосфера не являются изолированными — они являются открытыми системами. Неправомерное применение законов классической термодинамики к открытым или неограниченным системам приводит к неверным выводам. Классическая термодинамика не позволяет определить направление эволюции природных систем.

Согласно второму началу термодинамики эволюция должна состоять в переходе к однородности и равновесию, к хаосу, при котором во всех частях системы будет одинаковая температура. Термодинамический вывод о направленности эволюции не согласуется с реальной биологической эволюцией на Земле, где развитие идет от простого к сложному. Классическая термодинамика

не может объяснить причину структурирования, наблюдаемого в живой и неживой природе.

Термодинамика имеет ограничения по масштабам рассматриваемых явлений как снизу, так и сверху. Законы классической термодинамики неприменимы к микросистемам, размеры которых сравнимы с размерами молекул. С другой стороны, верхняя применимость законов термодинамики определяется галактическими размерами, при которых определяющую роль играют гравитационные силы.

Неправомерное использование второго начала термодинамики для рассмотрения процессов во Вселенной привело к созданию теории «тепловой смерти» Вселенной. Согласно этой теории Вселенная рано или поздно придет в состояние термодинамического равновесия, при котором все процессы прекратятся и мир погрузится в состояние «тепловой смерти». Клаузиус писал: «Энергия мира остается постоянной, энтропия мира стремится к максимуму».

С точки зрения современной физики Вселенная представляет собой расширяющуюся систему, т. е. нестационарную систему; поэтому законы термодинамики не могут быть к ней применены.

Классическая термодинамика изучает равновесные или квазиравновесные процессы, т. е. процессы, протекающие бесконечно медленно. Таким образом, классическая термодинамика является по сути термостатикой, и она не может решать вопросы, связанные с определением скорости или времени протекания термодинамических процессов.

Перейдем к краткому рассмотрению основных положений нелинейной неравновесной термодинамики. В ней уже рассматриваются системы, находящиеся в состоянии, далеком от термодинамического равновесия. Термодинамические параметры, такие как давление P , температура T уже не являются характеристиками всей системы, а могут меняться в различных частях системы и во времени t :

$$P = P(x, y, z, t), \quad T = T(x, y, z, t).$$

Состояние системы называется стационарным, если термодинамические параметры не зависят от времени. В стационарном состоянии в системе существуют потоки, обуславливающие пространственное распределение термодинамических параметров. В отличие от термостатики в современной термодинамике законы выражаются в дифференциальной (локальной) форме.

Дифференциальная форма первого закона определяет, что скорость изменения плотности энергии $\varepsilon = \frac{dE}{dV}$ (где E — энергия системы, V — ее объем) в каждой точке системы равна дивергенции плотности потока энергии $\mathbf{j} = \varepsilon \mathbf{v}$ ($\mathbf{v}$ — скорость потока), взятой с обратным знаком:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\operatorname{div} \mathbf{j}.$$

Термодинамические процессы в неравновесных системах происходят так, что в каждой точке системы скорость производства плотности энтропии $s = \frac{dS}{dV}$ больше нуля:

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)_i > 0.$$

Изменение плотности энтропии определяется не только производством плотности энтропии, но и потоками плотности энтропии, поэтому второе начало термодинамики в дифференциальной форме имеет вид

$$\frac{ds}{dt} = -\operatorname{div} \mathbf{j}_s + \left(\frac{ds}{dt}\right)_i,$$

где $\mathbf{j}_s = s\mathbf{v}$ — плотность потока энтропии. Знак $\operatorname{div} \mathbf{j}_s$ может быть как положительным, так и отрицательным, но знак $\left(\frac{ds}{dt}\right)_i$ всегда положительный, что указывает на конечность скорости термодинамических процессов. Скорость производства плотности энтропии выражается через плотность потока j_k и термодинамическую силу X_k следующим образом:

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)_i = j_k X_k.$$

В замкнутых термодинамических системах энтропия стремится к максимальному значению, при этом скорость изменения энтропии стремится к нулю. Эти соотношения определяют эволюцию замкнутых систем.

Пригожин показал, что в рамках линейной термодинамики (в линейной термодинамике термодинамические потоки линейно связаны с термодинамическими силами $J_r = \sum_l L_{kl} X_l$, где L_{kl}

кинетические коэффициенты) термодинамическая система эволюционирует к состоянию с наименьшей из возможных в данных условиях скоростью производства энтропии. Таким образом, термодинамическая система стремится к стационарному, но не равновесному состоянию. Эволюционный критерий открытой системы, таким образом, отличается от эволюционного критерия замкнутой системы.

Природные системы характеризуются значительным отклонением от равновесного состояния. Только в этих условиях может выполняться условие превышения экспорта энтропии над ее производством. Образование структур в системе начинается после того, как отвод энтропии превысит некоторое критическое значение. Отвод энтропии в системе происходит под действием так называемого «энтропийного насоса». Энтропийные насосы могут быть расположены как внутри, так и вне системы. Пассивные структурообразующие системы связаны со средой, в которой находятся энтропийные насосы. Активные структурообразующие системы содержат энтропийные насосы внутри себя. При достижении определенных критических значений внешних параметров система может переходить в качественно новое состояние. Это новое состояние характеризуется более высоким уровнем самоорганизации, возникновением в системе макроскопических структур, которые называются диссипативными структурами. Простейшим типом диссипативных структур являются стационарные диссипативные структуры, не изменяющиеся во времени, для которых при постоянных внешних условиях

$$dS = dS_e + dS_i = 0,$$

$$dS_e = -dS_i < 0.$$

Система отдает энтропию, чтобы компенсировать ее производство внутри системы.

Постоянный экспорт энтропии является необходимым термодинамическим условием самоорганизации. Начало процесса самоорганизации обуславливается неустойчивостью того или иного вида. Макроскопические структуры формируются при усилении микроскопических флуктуаций. Термодинамические неустойчивости играли важную роль на ранних этапах эволюции Земли. Развитие неустойчивости обуславливается тем, что пространственно структурированная конфигурация энергетически более выгодна, чем однородное распределение. Система является неустойчивой, если она обладает возможностью к оптимизации термодинамического состояния, например путем разделения на

фазы. Развитие неустойчивости и формирование структур часто наблюдаются в гидродинамических системах, которые получают энергию от внешних источников и находятся вдали от состояния равновесия. Хорошо известными примерами таких гидродинамических систем являются, например, течения, возникающие между вращающимися цилиндрами, или структура течений, возникающих при обтекании цилиндра потоком жидкости. В последнем случае в зависимости от числа Рейнольдса $Re = \frac{dv}{\nu}$ (d — диаметр цилиндра, v — скорость, ν — кинематический коэффициент вязкости) структура течения меняется от стационарного, осесимметричного, безотрывного к стационарному неосесимметричному, далее — к нестационарному, периодическому и, наконец, к турбулентному.

Для нелинейных динамических систем характерно наличие критических управляющих параметров процесса, при превышении которых поведение системы резко изменяется. Например, в случае конвекции от тепловых источников управляющим параметром является мощность нагревателя. Для точечного источника тепла при докритических значениях подводимой мощности вокруг нагревателя образуется слой прогретой жидкости с незначительными градиентами температуры и плотности [148]. Эта область излучает линейную диссипативно-гравитационную волну. При увеличении мощности теплового излучения растет скорость индуцированного течения. При превышении критического значения мощности происходит резкое изменение структуры конвективного течения — над нагревателем формируется всплывающая струя, вокруг которой возникает купол погружающейся жидкости. Число конвективных слоев или ячеек, образующихся при формировании конвективного движения от точечного источника, зависит от подводимой мощности. Реализуется набор критических значений мощности, при превышении которых число конвективных ячеек увеличивается на единицу.

При достижении определенных критических значений внешних параметров система может переходить в качественно новое состояние. Это новое состояние характеризуется более высоким уровнем самоорганизации, возникновением в системе макроскопических структур, которые называются диссипативными структурами. Переход системы в новое состояние происходит скачком при некоторых критических значениях параметров. Принципиально важно, что система меняет свое состояние вероятностным образом. Диаграмма зависимости скорости производства энтропии от термодинамической силы состоит из двух областей

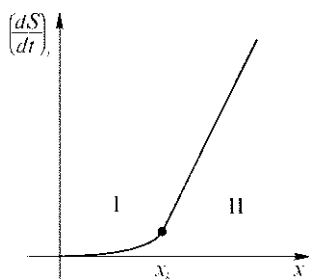


Рис. 17.8. Универсальная диаграмма эволюции системы: I — область термодинамических сил, при которых производство энтропии обеспечивается поведением элементов системы; II — область существования диссипативных структур, где производство энтропии обеспечивается макроскопическими процессами

(рис. 17.8). В первой области, где скорость производства энтропии обеспечивается хаотическим поведением частиц, составляющих систему, поведение термодинамической системы описывается линейной термодинамикой. Во второй области, в которой существуют диссипативные структуры, и производство энтропии обеспечивается макроскопическими процессами, поведение системы уже описывается нелинейной термодинамикой. Такой переход от одного режима производства энтропии к другому имеет место, например, при смеше ламинарного движения на турбулентное или при образовании конвективных ячеек Бенара в жидкости в случае увеличения градиента температуры.

Классическим примером диссипативных структур являются циркуляционные ячейки Бенара. Представим себе следующую картину. Жидкость, налитая в широкий плоский круглый сосуд, подогревается снизу, охлаждается сверху. Будем считать, что плотность линейно зависит от температуры, вязкость и коэффициент теплопроводности от температуры не зависят. Температуры на дне и поверхности жидкости поддерживаются постоянными, а разность температур между ними можно медленно изменять (рис. 17.9). Рассмотрим поведение некоторого малого объема жидкости при изменении его температуры. Если температура этого объема равна температуре окружающей жидкости, то он будет находиться с ней в равновесии. Если в результате флуктуаций рассматриваемый объем жидкости переместился вверх, то он окажется

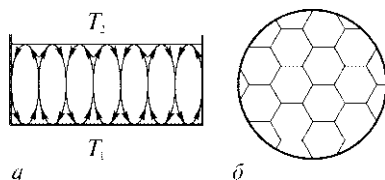


Рис. 17.9. Образование ячеек Бенара, вид сбоку (а). Ячейки Бенара: вид сверху (б)

среди более холодной жидкости, и на него будет действовать выталкивающая сила. Под действием этой силы объем жидкости переместится еще выше, выталкивающая сила возрастет и т. д.

Образуется положительная обратная связь. Аналогично при смещении воображаемого объема жидкости вниз возникает положительная обратная связь, приводящая к еще более сильному заглублению жидкости. Наряду с механизмами положительной обратной связи существуют механизмы отрицательной обратной связи, обусловленные вязкостью и диффузией тепла.

Будем увеличивать разность температур между дном и поверхностью жидкости. После того, как градиент температуры в жидкости превысит некоторое критическое значение, вся жидкость в сосуде разбивается на систему гексагональных циркуляционных ячеек. В центральной части ячейки жидкость поднимается, а в пограничных боковых гранях опускается. В поверхностном слое жидкость растекается от центра к краям, а в придонном — наоборот. В зависимости от знака температурной зависимости коэффициента молекулярной вязкости от температуры направление движения в ячейках изменяется на обратное. При подогревании тонкого протяженного слоя возможно возникновение конвективных ячеек в форме валов. Поверхностное натяжение жидкости вследствие зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры может осложнить явление. Возникновение циркуляционных ячеек обеспечивает передачу большего теплового потока в жидкости по сравнению с тепловым потоком, который передавался только за счет молекулярной теплопроводности (рис. 17.10). Гигантская структура таких ячеек наблюдается на Солнце, движение материков обусловлено конвективными процессами в Земле.

Если этот же сосуд, не нагревая его снизу, заставить вибрировать, то в жидкости при определенных частотах вибрации могут возникать упорядоченные структуры, обусловленные уже внешним механическим воздействием.

Приведем оценку экспорта энтропии для ячеек Бэнара. Пусть температура нижней поверхности равна T_1 , температура верхней

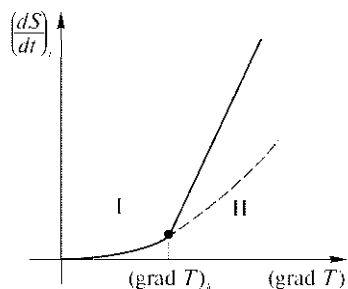


Рис. 17.10. Зависимость скорости производства энтропии в жидкости от вертикально направленного градиента температуры: I — область хаотического движения молекул; II — область конвективных потоков

поверхности равна T_2 , а в единицу времени от нижней поверхности к верхней поступает поток тепла q . В этом случае полный поток энтропии через граничную поверхность системы равен

$$\frac{dS_e}{dt} = q \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \frac{q(T_2 - T_1)}{T_1 T_2} < 0.$$

Таким образом система экспортирует энтропию. Число Рэлея, характеризующее меру отклонения от положения равновесия, равно

$$Ra = \frac{g\alpha\beta h^4}{k\nu},$$

где g — ускорение свободного падения, h — толщина слоя, β — градиент температуры, α — коэффициент объемного расширения, k — коэффициент теплопроводности, ν — коэффициент кинематической вязкости. Число Нуссельта Na , характеризующее меру отклонения от линейного режима, равно отношению полного теплового потока и части теплового потока, обусловленного теплопроводностью. На зависимости Na от Ra существует несколько изломов. При соответствующих критических значениях Ra происходит перестройка характера конвективных движений, изменяется скорость производства энтропии.

В реальных условиях протекание явления Бенара много сложнее. Значительную роль играют зависимость поверхностного натяжения от температуры и неустойчивость Марангони. Существуют пространственные, временные и пространственно-временные диссипативные структуры. Конвективные ячейки Бенара, кольца Сатурна являются примерами пространственных диссипативных структур. Временные и пространственно-временные диссипативные структуры возникают, например, при протекании некоторых нелинейных химических реакций.

Хорошо известным примером таких реакций являются реакции Белоусова (рис. 17.11). В 1951 г. Белоусов показал, что в смеси лимонной кислоты, бромата калия $KBrO_3$ и сульфата церия $Ce(SO_4)_2$ происходит реакция восстановления церия:



и реакция окисления церия:

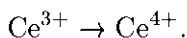




Рис. 17.11. Концентрационные волны в реакции Белоусова (а) и вложенные волны в реакции Белоусова (б)

Реакция окисления церия является автокаталитической, т. е. продукты реакции являются ее катализаторами. Сначала протекает медленная реакция восстановления церия, так как Br^- действует как сильный замедлитель. После превращения всего Ce^{4+} в Ce^{3+} начинается быстрая реакция окисления Ce^{3+} . Затем процесс повторяется сначала. Так как избыток Ce^{3+} окрашивает раствор в красный цвет, а избыток Ce^{4+} окрашивает раствор в синий, наблюдается периодическое изменение цвета раствора. Колебания будут происходить до тех пор, пока не будут израсходованы все реагенты реакции. При протекании этих химических реакций в тонком слое будет иметь место образование пространственно-временных структур, которые имеют форму кольцевых или спиральных волн. Спиральные волны образуются при разрыве плоских или кольцевых волн. Источники кольцевых волн называются ведущими центрами, которые возникают в результате случайных флуктуаций концентраций.

Общим в процессах самоорганизации является совместное или когерентное движение большого числа элементов системы. Для таких процессов самоорганизации используется термин «синергетика» (от греческого *synergeia* — совместное или кооперативное действие). Природа процессов самоорганизации заключается в том, что термодинамическая система, находящаяся вдали от равновесного состояния в нелинейной области теряет устойчивость и под действием малых флуктуаций переходит в новое состояние, при котором в системе реализуется кооперативное движение макроскопических частиц системы.

Вывод нелинейной термодинамики о возможности образования структур, т. е. о возможности саморазвития системы без внешних организующих факторов является принципиально важным, так как приводит к возможности образования жизни естественным путем, без вмешательства потусторонних сил.

Основным источником энергии, поступающей на Землю, является Солнце. Солнечное излучение формируется в результате интенсивного взаимодействия с веществом в верхних слоях Солнца и находится с ним в равновесии. Электромагнитное излучение Солнца можно охарактеризовать двумя температурами — энергетической, которая определяется законом Стефана Больцмана, и спектральной, определяемой из закона Вина. Для равновесного излучения эти температуры равны. Показателем неравновесности излучения может служить разность энергетической и спектральной температур. По мере удаления от поверхности Солнца энергетическая температура падает, а спектральная температура остается без изменения. Таким образом, неравновесность излучения по мере удаления от Солнца возрастает. Поэтому с увеличением расстояния от Солнца создаются более благоприятные условия для процессов самоорганизации, которые протекают в неравновесных условиях. С другой стороны, сложность образуемых систем зависит от температуры. С увеличением расстояния от Солнца температура падает, поэтому существует некоторое оптимальное расстояние, на котором возможно образование систем максимальной сложности. Уровень самоорганизации системы определяется степенью отклонения от равновесного состояния и уровнем сложности. В солнечной системе наиболее оптимальное сочетание названных параметров наблюдается на расстояниях, соответствующих орбите Земли. Таким образом, в Солнечной системе наибольший уровень самоорганизации может быть достигнут на Земле.

Земля находится в состоянии энергетического равновесия с приходящим солнечным излучением. Средняя температура Земли не изменяется уже несколько миллионов лет. Спектральная излучательная способность солнечного излучения близка к температуре абсолютно черного тела при 6000 К и существенно отличается от аналогичной характеристики земного излучения. Это обусловлено тем, что средняя температура Земли гораздо ниже — около 300 К. При равенстве мощности падающего на Землю и испускаемого ей излучения и таком различии спектральных характеристик Земля излучает примерно в 20 раз больше фотонов, чем поглощает. Плотность энтропии излучения пропорциональна плотности фотонов, значит, Земля излучает энтропии в 20 раз

больше, чем получает. То есть Земля является мощным генератором энтропии. Этот рост скорости производства энтропии обеспечивается диссипативными структурами, существующими на нашей планете, в биосфере. Одним из основных признаков самоорганизующейся системы является когерентное поведение ее элементов. Примером когерентного поведения являются крупномасштабные течения и вихревые образования в атмосфере и океане. Для живых существ также характерно когерентное поведение, которое в этом случае обеспечивается генетическим кодом или стереотипами поведения.

Приведем оценку экспорта энтропии на Земле. Плотность энергии абсолютно черного излучения равна $I_e = \sigma T^4$, а плотность энтропии $I_s = \frac{4}{3} \sigma T^3$. Выражая I_s через I_e , получим

$$I_s = \frac{4}{3} \frac{I_e}{T}.$$

Таким образом, скорость производства энтропии на Земле равна

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{4}{3} I_e \left(\frac{1}{T_C} - \frac{1}{T_3} \right),$$

где T_C — температура солнечного излучения, T_3 — средняя температура поверхности Земли. Подставив соответствующие цифры, получим, что $\frac{dS_e}{dt} = -6 \cdot 10^{14}$ Вт/К. Оценки экспорта энтропии за счет разности температур внутренних и поверхностных слоев Земли дают величину на три порядка меньшую. Таким образом, основную роль в экспорте энтропии играет коротковолновое солнечное излучение. Экспорт энтропии обеспечивает компенсацию ее производства в земных оболочках. Климатические и погодные процессы являются наиболее энтропийно емкими. Конвективные магматические процессы являются формой диссипативных структур, подобных ячейкам Бенара. Оценки числа Рэлея для магмы дают надкритические значения. Структура возникающих конвективных ячеек значительно осложняется вследствие вращения Земли. Согласно некоторым моделям дрейф континентов обусловлен именно конвективными течениями. Системы гигантских атмосферных ячеек Хэдли, Ферреля, полярные ячейки формируются из-за разности температур и под действием отклоняющей силы Кориолиса.

Мы остановимся на приведенном выше определении экологии, которое является, с одной стороны, наиболее общим, а с другой стороны — наиболее «физическим». При этом экология

понимается как наука, изучающая процессы самоорганизации и эволюции систем в живой и неживой природе. При таком определении хорошо видна особая роль физики в изучении важнейших проблем экологии. Круг этих вопросов может быть выделен в особую отрасль физики — экологическую физику. Геофизика (физика Земли), изучающая, в частности, физические процессы в литосфере, гидросфере, атмосфере, по сути исследует физические процессы в биосфере. Физика, накопившая богатейший опыт исследования закономерностей физических процессов, протекающих в оболочках Земли, на стыке которых и формируются жизненно важные экосистемы, подверженные влиянию геоэволюционного и катастрофически возрастающего антропогенного факторов, может взять на себя решение ряда проблем, связанных с оздоровлением экологического климата. Широкий спектр физических методов изучения вещества должен найти применение в создании эффективных средств мониторинга экосистем различного уровня. Опыт разработки физико-математических моделей природных процессов также может быть полезным в исследовании влияния антропогенных воздействий на функционирование экосистем. Все перечисленные направления могут быть отнесены к сфере интересов новой развивающейся области науки, находящейся на стыке экологии и физики, экологической физики. Содержание этой области еще четко не определено и находится в стадии становления, о чем свидетельствуют материалы четырех Всероссийских конференций «Физические проблемы экологии», проведенных в 1997, 1999, 2001 и 2004 гг. в МГУ.

Глава 18

Глобальный экологический кризис и его модели

В конце второго тысячелетия человечество осознало, что его дальнейшему существованию угрожает глобальный экологический кризис, возникший, прежде всего, в результате антропогенных воздействий на окружающую среду. Ученые расходятся в оценках сроков наступления глобального экологического кризиса, согласно некоторым оценкам кризис еще не наступил, согласно другим уже начался, согласно третьим кризис начался еще в начале XX века. Нет единого мнения по поводу его причин. Но нет расхождений в главном — глобальный экологический кризис есть следствие развития нашего типа цивилизации, ориентированной на безудержный рост потребления, прежде всего материальных благ. Расширение и углубление кризиса представляет опасность для дальнейшего существования человечества.

Важную роль в понимании мировым сообществом опасности экологического кризиса сыграла деятельность Римского клуба. Римский клуб как международная неправительственная организация был создан в 1968 г. Основатель Римского клуба Аурелио Печчеи (Aurelio Peccei) был глубоко обеспокоен судьбой человечества. Он сумел организовать широкие научные исследования перспектив развития человечества. Результаты этих исследований были доведены до широкой общественности. Книжки «Пределы роста», «За пределами роста» стали бестселлерами и заставили многих жителей Земли осознать особенность экологической революции. Для экологической революции характерно экспоненциальное развитие основных определяющих ее процессов. В условиях экспоненциального развития важную роль начинает играть фактор времени, его дефицит определяет важность выбора правильной стратегии действий человечества, так как времени на исправление ошибок может просто не быть.

Кратко опишем результаты исследований, изложенные в работах «Пределы роста» и «За пределами роста» [82].

Книга «Пределы роста» была написана в 1972 г. группой специалистов по системному анализу из Массачусетского технологического института с целью исследования перспектив роста населения Земли и экономики. Основные выводы работы состояли в следующем.

1. При сохранении существующих темпов развития человечества в ближайшие 100 лет будут достигнуты и превзойдены пределы. В результате будет наблюдаться резкое неконтролируемое снижение численности населения, уменьшение объемов производства, других показателей, характеризующих степень развития человечества.
2. Эти тенденции развития можно изменить и создать условия экологической и экономической стабилизации. В условиях глобального равновесия каждый член общества имеет возможность удовлетворить свои материальные потребности и иметь равные возможности для реализации своего творческого потенциала.
3. При выборе варианта стабилизации вероятность его реализации тем выше, чем быстрее человечество к нему приступит.

Через 20 лет после опубликования книги «Пределы роста» вышла новая работа «За пределами роста». В ней подводятся итоги развития человечества за 20 лет. Основные выводы этой работы состоят в следующем.

1. Темпы использования человечеством многих видов ресурсов и темпы производства загрязнений уже превышают допустимые пределы. Без существенного сокращения материальных потоков в ближайшее время произойдет падение производства и продуктов питания.
2. Это сокращение не является неизбежным. Для его предотвращения необходимо:

пересмотреть политику роста населения и потребления материальных благ;

- повысить эффективность использования материальных ресурсов.

3. Человечество еще не потеряло возможность перехода к устойчивому обществу. Переход к этому типу общества означает отказ от роста и переход к достаточности потребления.

Таким образом, для выживания человечеству необходимо перейти к устойчивому обществу, человек должен отказаться от сложившегося представления прогресса и перейти к концепции устойчивого развития.

Конференция ООН по охране окружающей среды в 1992 г. (Рио-де-Жанейро) разработала принципы и рекомендации перехода стран планеты к концепции устойчивого развития. В России «Концепция перехода РФ к устойчивому развитию» [62] утверждена Указом Президента РФ в 1996 г. В Концепции обосновывается необходимость и возможность постепенного перехода РФ к устойчивому развитию, которое должно обеспечить сбалансированное решение социально-экономических задач и проблем сохранения окружающей среды в целях удовлетворения жизненных потребностей нынешнего и будущих поколений. В качестве конечной цели перехода России на модель устойчивого развития выдвигается формирование нового состояния общества (ноосферы — «сферы разума» Вернадского), в котором важнейшим мерилom национального богатства станут духовно-нравственные ценности и знания человека, живущего в гармонии с окружающей средой. Переход к устойчивому развитию означает создание нового мышления, новых общественных ценностей, предполагает постепенное восстановление естественных экосистем до уровня, гарантирующего стабильность окружающей среды. Общепринятый взгляд на развитие цивилизации и рост населения заключается в том, что этот рост воспринимается как естественный процесс, который должен сопровождаться непрерывным улучшением жизни людей. Этот традиционный взгляд на развитие цивилизации должен быть заменен, поскольку продолжение развития цивилизации натолкнется на тот или иной пороговый уровень (предел), превышение которого приведет к ее гибели. Существование пределов в развитии человечества является естественным, эти пределы принципиально неустранимы. Для сохранения человечества необходимо изменить направление развития цивилизации. Развитие человека должно заключаться в оптимизации уровня потребления материальных благ и росте (неограниченном) духовных потребностей, необходим переход от

безграничного материального обогащения к творчеству, гармонии с природой. Такое развитие человека должно явиться основой изменения демографической ситуации на планете. Вопрос о форме перехода человечества в ноосферу требует дальнейших исследований.

Описание планетарной ситуации в работах «Пределы роста» и «За пределами роста» проводится в следующей последовательности. Сначала рассматриваются глобальные изменения, происходящие на планете, затем основные глобальные (планетарные) пределы и, наконец, способы, позволяющие избежать выхода за пределы. При этом все рассмотренные основные элементы глобальной системы: численность населения планеты, промышленное производство, потребление ресурсов, загрязнение окружающей среды находятся в состоянии экспоненциального роста. Экспоненциальный рост — причина движения человечества, мировой экономики к физическим и экологическим пределам планеты.

В 1650 г. численность населения планеты составляла около 0,5 млрд человек, рост населения был равен 0,3% в год, время удвоения составляло 250 лет (рис. 18.1). В 1900 г., т.е. как раз

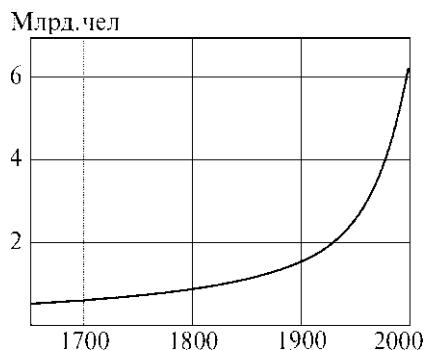


Рис. 18.1. Рост численности населения планеты с начала промышленной революции

через период удвоения, численность населения составила уже 1,6 млрд человек, рост — 0,5% в год, время удвоения 140 лет. В 1970 г. численность составила 3,6 млрд, рост был равен 2,1%. В 1991 г. население уже достигло 5,4 млрд человек, темпы роста несколько упали до 1,7%. Два контура обратной связи в системе народонаселения (контур рождаемости — положительная обратная связь, контур смертности — отрицательная обратная связь) обеспечивают реализацию различных моделей

развития — рост численности населения, падение, стабилизация. Демографы разделяют все страны планеты по темпам роста населения на 3 группы. Для первой группы характерны высокие показатели рождаемости и смертности, для второй — высокие показатели рождаемости и низкие показатели смертности. В третьей группе, куда входят в основном развитые страны, имеют

место низкие рождаемость и смертность. По мере промышленного развития страны, темпы роста населения, как правило, снижаются, и страна переходит из первой группы во вторую, а затем и в третью. Однако в соответствии с теорией демографического перехода снижение темпов рождаемости происходит с некоторым запаздыванием относительно темпов промышленного развития.

Рост промышленности также происходит экспоненциально. В исследовании «За пределами роста» капитал подразделяется на промышленный, сектор услуг, сельское хозяйство. Их соотношение и роль меняются по мере развития капитала. На ранних стадиях развития преобладает сельское хозяйство, затем определяющую роль начинает играть промышленный капитал, и, наконец, возрастает роль сферы услуг. Однако сфера услуг может быть основана только на развитых промышленном капитале и сельском хозяйстве. Наличие в системе двух контуров обратной связи (положительный — обусловленный инвестициями, отрицательный — обусловленный обесцениванием капитала) может привести как к экспоненциальному росту, так и к падению или стабилизации.

Рост загрязнений, обусловленный экспоненциальным развитием промышленности, сельского хозяйства также имеет экспоненциальный вид.

Темпы промышленного роста выше темпов роста населения, однако пространственная неравномерность распределения производства и населения приводит к тому, что в ряде стран имеет место падение производства на душу населения. Практически рост населения приводит к росту нищеты. Несмотря на различие в темпах роста производства и населения, конечный результат развития общества согласуется с прогнозом Мальтуса.

Для того, чтобы человечеству выбраться из этого порочного круга, необходимо рассмотреть в единой связи экономику и окружающую среду (рис. 18.2). В процессе производства из недр Земли извлекается основная масса сырья, большинство видов энергии, в землю же возвращаются отходы и тепло. Для Земли характерно постоянство естественных потоков вещества и энергии от источников к стокам. Существуют естественные пределы использования человечеством вещества и энергии и пределы темпов поступления отходов в планетарные стоки. Любой вид ресурсов, используемый человечеством, ограничен своими источниками и стоками. Для того чтобы избежать выхода за пределы устойчивого потребления, необходимо руководствоваться следующими правилами.

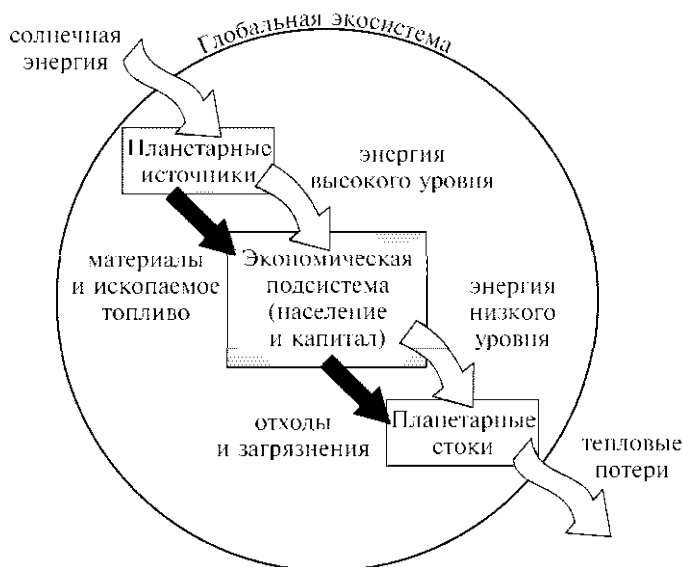


Рис. 18.2. Население и капитал в глобальной экосистеме. Население и капитал зависят от потоков топлива и невозобновимых ресурсов планеты и производят потоки тепла и отходов, которые загрязняют окружающую среду

Для возобновимых источников темпы потребления не должны превышать темпов регенерации.

Для невозобновимых источников темпы потребления не должны превышать темпов их замены на возобновимые ресурсы.

Для загрязняющих веществ предельная интенсивность выбросов не должна превышать скорости, с которыми эти вещества перерабатываются, поглощаются.

Рассмотрим основные пределы. Почва является одним из основных пределов производства продуктов питания. В последнее время площади обрабатываемых земель сокращаются. Эрозия, засоление, опустынивание, урбанизация — эти процессы опережают темпы освоения новых земель. Опустынивание стало важнейшей глобальной экологической проблемой человечества. С 1970 г. по 1990 г. пустыни распространились на 120 млн га, что больше площади обрабатываемых земель Китая. За тот же период на Земле потеряно 480 млрд т верхнего пахотного слоя, что равно массе всех пахотных земель Индии.

В настоящее время хозяйственной деятельностью не затронуто только 28% поверхности суши (не учитывая материковых льдов). Площадь земель, пригодных для хозяйственной деятельности, составляет около 60 млн км². Из-за нерационального использования земли ежегодно выбывает из хозяйственного оборота около 6 млн га. В настоящее время на планете обрабатывается 10,4% площади суши. В расчете на человека приходится около 0,5 га. Согласно оценкам ЮНЕП, опустынивание захватило 35% суши. ООН принято ряд программ, реализация которых должна привести к уменьшению роста антропогенных пустынь. Ряд стран уже достиг определенных успехов в борьбе с опустыниванием. Например, в США в результате применения прогрессивных методов обработки почвы на одну треть уменьшились годовые темпы роста эрозии почв. В прошлое ушли знаменитые песчаные бури в Техасе.

Земельный фонд России составлял в 1995 г. 1710 млн га, из них 1100 млн га приходится на зону вечной мерзлоты. Сельскохозяйственные угодья занимают только 13% от площади земельного фонда. За пять последних лет площадь пашни уменьшилась на 9,5 млн га, площадь земель сельскохозяйственного назначения сократилась на 27 млн га. Наблюдается рост эрозии почв, повышается кислотность, растет дегумизация и другие виды деградации земель. В настоящее время имеет место сокращение объема работ по рекультивации и мелиорации. Рост нагрузки на пастбища приводит к их деградации. Около 43% пашни России имеют низкое содержание гумуса, на 15% пашни содержание гумуса критическое. Около 60% подвержено действию эрозии. За последнюю четверть века площадь сельскохозяйственных угодий, приходящихся на жителя России, уменьшилась на 24%, а площадь пашни — на 20%.

Важнейшим фактором деградации земель РФ является их загрязнение. Широкое использование для орошения загрязненных вод, загрязнение воздуха, нарушение норм внесения удобрений, аварии на трубопроводах приводят к поступлению и накоплению в почве вредных веществ.

Значительная часть земель РФ загрязнена радионуклидами. В результате только Чернобыльской катастрофы земли 19 областей и 3 республики РФ подверглись радиоактивному загрязнению.

Эрозия почв представляет собой разрушение и вынос почвенного слоя ветром или потоком воды. Для создания плодородного

почвенного слоя природа потратила несколько тысяч лет, разрушение же происходит за несколько лет или даже за одну пылевую бурю или ливень. Эрозия почв уменьшает урожайность зерновых в 3–4 раза.

Нарушение землепользования в береговой зоне приводит к развитию береговой эрозии. Особенно сильно развита эрозия в горной местности. В результате развития процессов эрозии возможно возникновение селевых потоков.

В настоящее время человечеством накоплен значительный опыт борьбы с эрозией. К методам борьбы с эрозией относится введение специальных севооборотов, полосное размещение сельскохозяйственных культур, посадка лесополос, специальные виды обработки почв, в том числе безотвальная вспашка. Применение специальных методов землепользования позволяет почти полностью устранить эрозию почв.

Площади на планете, потенциально пригодные для сельскохозяйственной обработки, оцениваются в 2–4 млрд га. В настоящее время обрабатываются около 1,5 млрд га. Расчеты показывают, что если исключить процесс эрозии, освоить все потенциально пригодные земли и увеличить в 2 раза среднюю урожайность, то к 2100 г. на Земле сможет проживать не более 12,5 млрд человек.

Вода тоже относится к возобновимым ресурсам. Суммарный годовой сток на планете составляет около 40 000 км³, а используется пока только 3 500 км³. Кажется, на планете еще есть существенные запасы воды. Однако надо учесть следующее. Большинство стоков (28 000 км³) — сезонно. Значительная часть рек находится в недоступных, малонаселенных районах. По оценкам географов величина доступного стока составляет всего 7 000 км³. Строительство плотин может изменить эту оценку до 9 000 км³. Например, крупнейшая река Амазонка с ее притоками концентрирует в себе до 15% общемирового дебита пресной воды. Однако эта вода используется на нужды лишь 0,4% населения Земли. Таким образом, 95% дебита Амазонки недоступны для использования. Весь этот громадный резерв пресной воды попадает в Атлантический океан. Вероятность того, что в ближайшем будущем будет расширено потребление воды из Амазонки, мала.

Конго (вторая по дебиту река в мире) дает 3,5% мирового дебита пресной воды, но ее водой могут пользоваться лишь 1,3% населения Земли. В ближайшие 30 лет 50% дебита Конго будут по-прежнему недоступны человеку. Эти оценки показывают ограниченность запасов важнейшего ресурса на планете — пресной воды.

С ростом народонаселения нашей планеты, с развитием промышленности и сельского хозяйства потребность в пресной воде резко возросла, и сейчас нехватка воды ощущается во многих районах Земли [104]. В последние 20–30 лет заметно обострились проблемы, связанные с противоречиями между растущими потребностями человечества и природными ресурсами. К числу таких проблем относится проблема загрязнения вод человеком и обеспечение населения питьевой водой полноценного качества. Недостаток в пресной воде отмечается на территории, составляющей около 60% всей площади суши Земли. Во многих районах Земли водный фактор начинает сдерживать развитие промышленности и сельского хозяйства. Так, если человеку требуется на питьевые и хозяйственные нужды около 300–400 л воды в сутки, то на производство 1 т сахара расходуется 100 тыс. л, стали — 150 тыс. л, а для выращивания 1 кг растительной пищи необходимо в среднем 2000 л воды.

По данным Всемирной организации здравоохранения примерно 1,2 млрд человек страдают от нехватки питьевой воды. Особую озабоченность вызывают факты ухудшения гигиенических показателей питьевой воды, что отрицательно сказывается на состоянии здоровья значительных по численности групп населения в ряде развивающихся и развитых государств. Многие реки и озера загрязнены настолько, что не только нельзя пить из них воду, но в них нельзя даже купаться.

Хорошая вода становится предметом экспорта. Так, например, чистые глубинные воды озера Байкал продаются в Германию и Японию. Но прежде, чем получить лицензию на продажу этой воды, нужно было доказать, что ее надо брать с глубины более 200 м, чтобы обеспечить необходимое ее качество. В Гонконг доставляют воду по специальным трубопроводам из Китая, а в засушливые годы для этого используются танкеры. В некоторых странах Европы рассматриваются проекты закупки пресной воды. Так, например, имеются проекты по транспортировке вод Онежского и Ладожского озер.

Если взять все пресные возобновляемые водные ресурсы, которые можно использовать для человека, то в мире их, казалось бы, не так и мало. Однако в реальности удастся добыть и дать потребителю примерно не более 5–10% имеющихся водных запасов. Например в ЕС используется в день на человека для домашних целей около 566 л в день, а в США — 1422 л. В перспективе по разным прогнозам к 2025 г. из возобновляемых источников будет использоваться около 40%, при этом безвозвратно используемые воды составляют сегодня уже около 15%.

Промышленность возвращает примерно 70–90% используемых вод, а сельское хозяйство, ирригация — 30–70%. За последние сто лет среднее потребление воды возросло с 1 000 до 2 000 л на человека в день. Но распределение потребления воды в мире очень неравномерно. В одних странах приходится всего 30 л в день на человека, как, например, в Кувейте, в США — 24 420, а в России больше всего в мире — 84 235 л.

Сколько же воды достаточно для всех пужд? Шведский ученый М. Фалксмарк ввел понятие так называемого «индекса водного стресса». На основе анализа имеющихся данных он предложил установить минимальный уровень, необходимый для более или менее нормальной жизнедеятельности в развивающихся странах. В соответствии с его предложениями человеку необходимо ежедневно 100 л воды для питьевых и других бытовых целей, кроме того вода нужна для выращивания сельскохозяйственной продукции, производства промышленной продукции и энергии. Таким образом, человеку нужно не менее 4 660 л воды в день. Если ресурсы дают меньше этого уровня, то население может испытывать определенный стресс от нехватки воды. Критический минимум воды — менее 2 740 л, а менее 1 370 л является абсолютным минимумом для выживания населения. При таких стрессовых условиях в мире проживают около 3,7% населения. Вода становится все больше в фокусе не только практических, экономических, но и политических интересов в мире. В будущем из-за воды в мире возможны серьезные конфликты и не исключаются даже войны. Военные конфликты могут порождать проблемы с водой. Так, например, при бомбардировках Югославии войсками НАТО был нанесен серьезный ущерб водам Дуная и водоемам. Подобное происходило во время войны США против Вьетнама и Камбоджи.

Леса также относятся к возобновимым ресурсам. К началу периода земледелия на Земле было 6 млрд га лесов, сейчас на планете осталось только 4 млрд га, причем первичных (таких, где не было вырубок и использования лесных ресурсов) — только 1,5 млрд га. 50% лесных массивов было уничтожено в период с 1950 г. по 1990 г. В США к настоящему времени уничтожено около 1/3 лесов, в Китае — 3/4. Темпы уничтожения лесов не падают. Ежегодно вырубается более 500 млн м³ леса в США. В Китае и Индии вырубается около 300 млн м³, в России до 120 млн м³ в год. Россия, имея 21% всех лесов мира, дает лишь 7% мировой эмиссии CO₂. Для сравнения укажем, что США имеют 4% лесов мира, 6% населения и дают 23% мировой

эмиссии CO_2 . Обширные лесные массивы умеренного климата сохранились лишь в России и Канаде.

В России сложилась катастрофическая ситуация с лесами и зелеными насаждениями. Лесные пожары стали национальным бедствием. В настоящее время площадь лесов составляет в РФ 760 млн га, что равно 20% мировых лесных ресурсов. Ежегодно в России от пожаров, насекомых, погодных условий гибнут сотни гектаров лесов, причем, наибольший урон лесам наносят пожары. В последние годы наблюдается уменьшение озеленения городов, обеспеченность жителей городов зелеными насаждениями в два раза ниже нормы.

Леса умеренного климата обладают способностью сохранять-ся при нарушении их видового состава, леса тропической зоны являются более уязвимыми. Уничтожение лесов, в основном, происходит из-за вырубki и роста загрязнений. Древесина по-прежнему широко используется не только как строительный материал, но прежде всего как источник энергии. Главная ценность лесов заключается в способности поглощать CO_2 и выделять кислород. Сохранившиеся лесные массивы, действительно, играют роль «легких планеты».

Важнейшим понятием, позволяющим осмыслить ограниченность ресурсов, которым и располагает человечество, является чистая первичная продукция биосферы. Чистая первичная продукция биосферы — это количество энергии, усвоенной из солнечного света зелеными растениями. Чистая первичная продукция является основой всех пищевых цепей. Человек потребляет не более 3% чистой первичной продукции, произведенной на суше, еще около 36% используется им косвенно. Если учесть чистую первичную продукцию океана, то человек, с учетом косвенного потребления, использует около 25% чистой первичной продукции всей биосферы. Эти цифры показывают, что существует важный предел в использовании ресурсов — объем чистой первичной продукции биосферы. И этот предел близок.

Ограниченность невозобновимых ресурсов наиболее ярко демонстрирует наличие пределов в развитии человечества.

Ископаемое топливо является одним из главных видов невозобновимых ресурсов. За период с 1860 г. по 1989 г. объем энергии, потребляемой человечеством, возрос в 60 раз. В настоящее время до 90% энергии получают из ископаемого топлива. Для потребления энергии характерна высокая пространственная неравномерность. Например, житель Северной Америки потребляет энергии в 40 раз больше, чем житель Африки или Азии. В 1990 г. срок истощения разведанных запасов нефти оценивался в 41 год,

газа — 60 лет, угля — 430 лет. Эти цифры носят оценочный характер, однако большинство ученых сходятся во мнении, что запасы ископаемого топлива на Земле ограничены. Вероятно, эра ископаемого топлива в истории человечества будет кратковременной. Хотя следует упомянуть, что есть некоторые ученые, отстаивающие теорию, согласно которой процесс образования нефти и газа в недрах еще происходит и носит биогеохимический характер.

Решить проблему получения энергии, с учетом ограниченности ископаемого топлива, можно двумя путями. Во-первых, необходимо повысить эффективность использования топлива. История нефтяного кризиса 1973 г. показала, что применение прогрессивных технологий может дать существенный эффект в экономии топлива. Во-вторых, необходимо развивать и широко использовать возобновимые виды получения энергии. Вопросы использования возобновимых видов энергии будут рассмотрены позднее.

Большое количество материалов, используемых в промышленности, также относится к категории невозобновимых ресурсов. В последнее время в развитых странах среднелюдское потребление основных видов материалов стабилизировалось, а в развивающихся странах продолжает расти, оставаясь меньше потребления развитых стран в 8–10 раз. Например, для того, чтобы каждый житель планеты в 2100 г. потреблял столько материалов, сколько сейчас потребляет средний американец, производство алюминия должно возрасти в 11 раз, меди в 12, стали в 7 раз. Земля не выдержит такие потоки материалов, земные стоки и источники уже близки к исчерпанию. Рост потребления материалов заставляет использовать все менее содержательные руды, использование которых приводит к росту загрязнения среды.

Для прогноза развития человечества авторами работы «За пределами роста» была разработана модель WORLD 3, в которой прослеживается развитие следующих элементов системы: население, капитал, загрязнение, пахотные земли. В модели учитывается экспоненциальный рост элементов системы, наличие пределов роста, изменение потоков ресурсов, конкуренция, а также время, необходимое для совершения того или иного действия, и наличие запаздывания во временных цепях. Элементы системы оказываются связанными между собой, эмпирические зависимости и связи носят часто нелинейный характер. Конечно, модель является очень примитивной по отношению к моделируемым процессам, но она предназначена для решения главной задачи — определения емкости планеты, то есть той численности

населения, которая может поддерживаться окружающей средой как угодно долго.

Основные пределы, которые были заложены в модель: площадь обрабатываемых земель (считалась равной 3,2 млрд га), продуктивность земель — считалась равной 6500 кг с гектара (что соответствует высшей на нынешний день урожайности), предполагалось, что запасов невозобновимых ресурсов должно хватить на 200 лет при сохранении объемов добычи 1990 г.

Всего был рассчитан временной ход более чем 200 переменных на интервале 1990–2100 гг. с дискретностью полгода. Модельный расчет по стандартному сценарию, при котором сохраняются все наблюдаемые в наше время тенденции развития, показывает, что должна наступить экологическая катастрофа (рис. 18.3). Попытки устранить ее путем внедрения новых технологических решений (использование энергии ядерного синтеза, замена ресурсов) без изменения парадигмы развития не удалось. Наблюдается только временное смещение наступления экологической катастрофы (рис. 18.4).

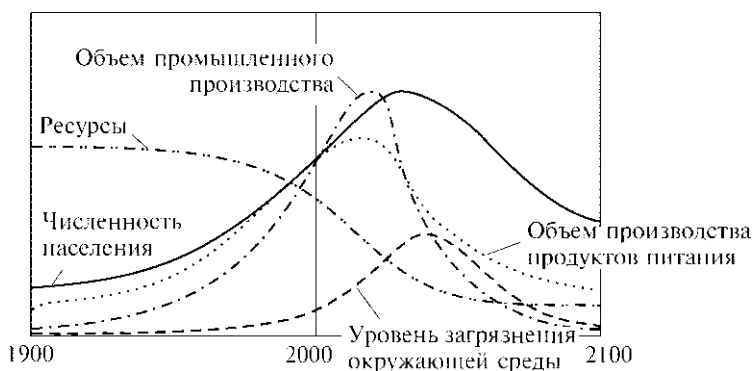
Возможность устранения катастрофы появляется только после того, как принимается программа стабилизации численности населения и объема промышленного производства, обеспечивается внедрение технологий, уменьшающих выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду (рис. 18.5). Только в этом случае у человечества появляется возможность перехода к устойчивому развитию. Устойчивое общество — это тип общества, который способен обеспечить существование на планете жизни многих поколений людей.

Изложенная концепция экологического кризиса базируется прежде всего на существовании пределов развития общества. Многие из этих пределов очевидны, другие пока нет.

Второе важнейшее положение изложенной модели — экспоненциальное развитие основных параметров, характеризующих развитие общества.

Третьим положением является существование в системе контуров (или цепей обратных связей) с разрушением и запаздыванием. Запаздывание сильно затрудняет адекватную реакцию, начинает действовать фактор времени, заключающийся в том, что для устранения действия того или иного разрушающего процесса необходим временной интервал, больший, чем время между моментом обнаружения разрушительного процесса и моментом гибели системы. Контур разрушения в системе может привести к уничтожению всей системы.

Состояние мира



Материальный уровень жизни

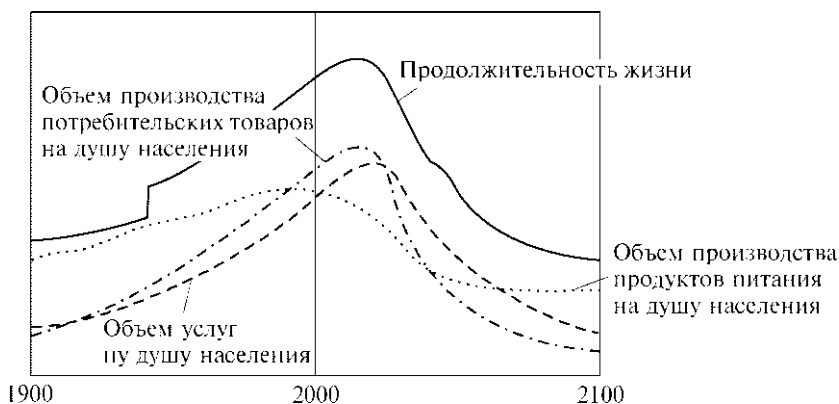
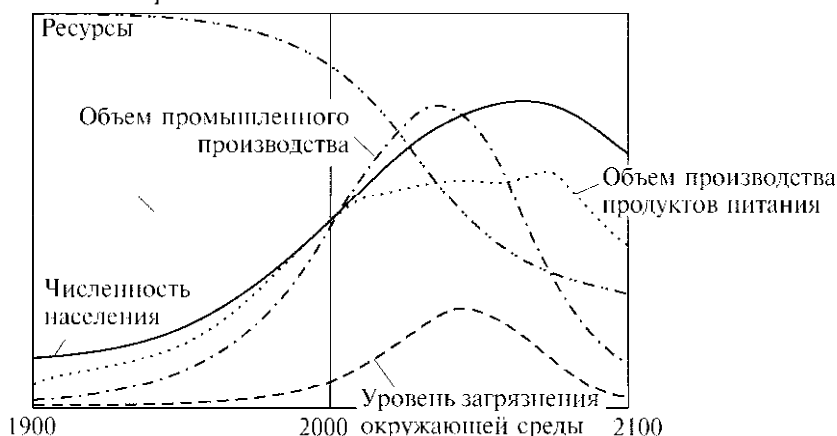


Рис. 18.3. Стандартный прогноз состояния человечества (без принятия каких-либо ограничений). Численность населения и объем промышленного производства растут до тех пор, пока состояние окружающей среды и природных ресурсов не ограничивает способности сектора промышленного капитала обеспечивать инвестиции

Ресурсные модели глобального экологического кризиса наглядны, производят сильное впечатление, однако доказательность достижения пределов оставляет желать большего. На основе ресурсной модели трудно делать количественные прогнозы. К ресурсным моделям следует отнести и модель «золотого миллиарда», в которой делается попытка доказать, что из-за ограниченности природных ресурсов на планете могут жить, удовлетворяя свои потребности, не более одного миллиарда человек. Остальная часть человечества, сильно сокращенная, должна

Состояние мира



Материальный уровень жизни

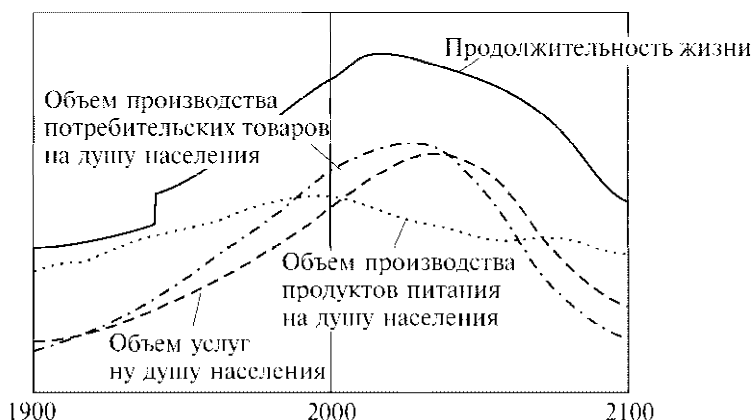
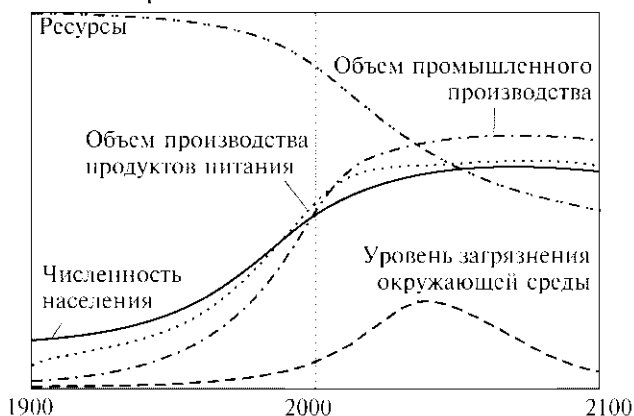


Рис. 18.4. Прогноз состояния человечества при удвоении запасов природных ресурсов, контроле за загрязнением окружающей среды, росте продуктивности земель и защите их от эрозии. Принятые меры отодвигают наступление кризиса, усугубляя его глубину

жить в резервациях, поставляя сырье и продукции в страны, вошедшие в «золотой миллиард».

Наряду с ресурсными моделями кризиса существуют и другие модели глобального экологического кризиса. Наиболее завершенной из них является модель, основанная на теории биотической регуляции [35]. В этой модели под глобальным экологическим кризисом понимается потеря устойчивости биосферы,

Состояние мира



Материальный уровень жизни

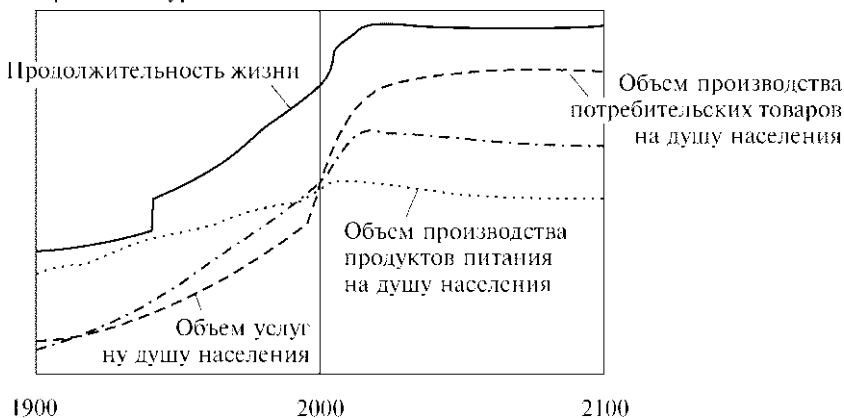


Рис. 18.5. Прогноз состояния человечества при принятии в 1995 г. программы стабилизации численности населения и объема промышленного производства, а также внедрения технологий, уменьшающих загрязнение среды, эрозии почв, повышающих эффективность использования природных ресурсов. Принятые ограничения устраняют катастрофу

которая приводит к резкому изменению потоков элементов в биосфере, прежде всего биогенных. Наиболее подробно эта модель кризиса изложена в учебном пособии [158]. Важнейшим проявлением кризиса является разрушение природных экосистем.

В настоящее время на Земле ненарушенные территории занимают только 27% поверхности. Для ненарушенных территорий

характерно наличие естественного растительного покрова и низкой плотности населения — менее 10 человек на 1 км². На частично нарушенных территориях находятся постоянные или сменяемые сельскохозяйственные угодья, вторичная естественно возобновляемая растительность, повышенная плотность домашнего скота, другие следы антропогенного воздействия. На нарушенных территориях расположены постоянные сельскохозяйственные угодья, городские поселения, отсутствует естественная растительность, проявляется опустышивание. Приятные на взгляд пейзажи Западной Европы представляют пример нарушенных территорий. На суше существуют три центра дестабилизации окружающей среды:

- Североамериканский, включающий США, часть Канады, частично Мексику;

Европейский, включающий Западную, Центральную и Восточную Европу;

- Азиатский, включающий Индостан, Цейлон, Малайзию, Бирму, Индонезию, Японию, Корейский полуостров.

Наряду с центрами дестабилизации на Земле выделяют следующие центры стабилизации, где еще сохранились достаточно большие ненарушенные территории:

Северный евроазиатский, который включает Север Европейской части РФ, Скандинавию, Восточную Сибирь, Дальний Восток;

- Североамериканский, включающий Канаду и Аляску;
- Южноамериканский, включающий Амазонию;

Австралийский, включающий почти всю территорию Австралии.

Мировой океан с сохранившимися природными экосистемами также пока является глобальным центром стабилизации.

Другим важнейшим показателем глобального экологического кризиса является потеря биоразнообразия биосферы. Человек в процессе хозяйственной деятельности лишает жизненного пространства другие виды. Согласно палеонтологическим данным

исчезнувшие виды никогда не появляются вновь. До настоящего времени нет точной оценки количества видов, обитающих на планете. Пока научно описано около 1,5 млн видов, но считается, что обитает на Земле от 5 до 30 млн видов. Поэтому трудно получить надежную оценку скорости вымирания видов. Ежегодно на Земле исчезает от 5 000 до 15 000 видов. Каждый вид играет определенную роль по регулированию и стабилизации окружающей среды, поэтому сокращение любого вида приводит сообщество организмов и всю биосферу в целом к менее устойчивому состоянию.

Химизация окружающей среды привела к нарушению циклов многих элементов в биосфере, возникли циклы, отсутствовавшие в природе. При сельскохозяйственной деятельности, освоении новых территорий происходит ускоренная минерализация ранее накопленного органического вещества и биомассы растений. На полях происходит искусственное размыкание потока биогенных элементов вследствие изъятия урожаев. Антропогенные потоки ряда элементов превысили их природные потоки. В процессе производственной деятельности человек нарушает естественные потоки энергии и вещества. Человечество использует во все возрастающем объеме энергию ископаемого топлива. Полезные ископаемые добываются, перерабатываются, после частичного использования превращаются в отходы. Наибольшее количество энергии в абсолютных и относительных величинах (на единицу площади) используют развитые страны. Энергопотребление на единицу площади в России на порядок и более отстает от стран Западной Европы. В конечном счете, это является одной из главных причин разрушения природных экосистем в этих странах.

Нарушение природных экосистем приводит к потере устойчивости биосферы, нарушается ее способность гасить на основе обратных связей возникающие возмущения. Причиной наступления глобального экологического кризиса авторы указанного выше пособия считают то, что человек уже превысил экологический предел потребления чистой первичной продукции. Согласно их оценке произошло это еще в начале нашего века. Единственный способ избежать дальнейшего углубления экологического кризиса заключается в возвращении в природные пределы потребления человечеством чистой первичной продукции. Только в этом случае может возродиться регулирующая функция биосферы.

Биосфера обладает мощными механизмами регуляции, которые подтверждаются, прежде всего, тем фактом, что геофизические процессы, способные полностью изменить биосферу за

период около 100 000 лет, не изменили ее за гораздо более продолжительный период. Эту неизменность окружающей среды обеспечивают процессы биотической регуляции. Биота обладает массой в сухом весе примерно в миллиард раз меньшей, чем Земля. Но обновление живого вещества происходит с большой скоростью (фитомасса суши обновляется примерно за 15 лет, биомасса океана примерно за 30 дней), поэтому общая масса живого вещества, образованного за время жизни, даже превосходит массу Земли.

Для того чтобы человек вернулся в состояние равновесия с природой, необходимо, прежде всего, осознать место человека (как биологического вида) в биосфере, его природное предназначение. Человек не является царем природы, ее хозяином. Согласно Горшкову [35], все консументы (потребители чистой первичной продукции) могут быть разбиты на 3 группы в зависимости от своих размеров. Первая группа размерами от 10^{-6} до 10^{-4} м (бактерии, грибы-сапрофаги) потребляет около 90% чистой первичной продукции. Вторая группа (беспозвоночные) с размерами от 10^{-4} до 10^{-2} м потребляет около 10% чистой первичной продукции. Третья группа с размерами от 10^{-2} до 1 м, в которую входит и человек, потребляет не более 1% чистой первичной продукции. С биосферной точки зрения человек отпосится к крупным передвигающимся животным, выполняющим задачу трепировки ремонтников биосферы. Основную работу по восстановлению биосферы после катастрофических воздействий различного рода как раз выполняют ремонтники биосферы. Для сохранения биосферы человек, прежде всего не должен превышать отведенную ему природой норму потребления чистой первичной продукции, должен обеспечивать постоянную, относительно низкую, плотность популяции. Не человек управляет биосферой, а биосферные сообщества определяют допустимую (и необходимую!) численность популяции человека. В осознании своего места в биосфере как раз и заключается разумность человека. Согласно оценкам, для того чтобы биосфера возвратилась в состояние, в котором бы в полной мере возобновилась работа биотической регуляции (поскольку биота при современной численности населения не способна регулировать возмущения антропогенного происхождения), численность населения планеты должна быть уменьшена в 10 раз!

Согласно [158], человек должен вернуться к собирательству и охоте (чем занималась основная масса людей при потреблении допустимого размера потребления чистой первичной продукции), но так как это маловероятно, авторы предлагают заниматься спортом и отдыхом, как основным видом деятельности. Авторы не указывают путей достижения этого состояния, хотя отмечают невозможность насильственной регуляции численности населения. Единственный возможный выход из кризисной ситуации — это переход на глобальное планирование семьи и введение всеобщей однополой рождаемости в семьях. При такой оценке человеческой деятельности весь период развития человечества от эпохи промышленной революции до наших дней оценивается как регресс.

Н. Н. Моисеев [84] считает, что избежать глобальный экологический кризис возможно путем коэволюции. Коэволюция представляет собой совместное развитие природы и общества, она может быть достигнута только на определенном этапе развития человечества, когда коллективный разум и воля человечества обеспечат ее реализацию. Наступающий глобальный экологический кризис подталкивает человечество к выбору этого пути. Согласно Моисееву, коэволюция — это единственный путь, который может обеспечить сохранение и развитие человечества, именно коэволюция раскрывает суть понятия устойчивого развития. Вместе с тем, при рассмотрении понятия коэволюции возникает следующий вопрос: «Как могут взаимодействовать на «равных» природа и общество, которое является, по сути, частью биосферы?». Напомним, что согласно классическому определению, биосфера представляет собой систему, включающую биоту (в том числе человека) и окружающую среду.

Глава 19

Загрязнения природной среды

Виды загрязнений

Загрязнением среды считается внесение в нее новых, не свойственных ей физических, химических, биологических составляющих или превышение естественного среднего уровня за многолетний период этих составляющих в среде. Материалы данной главы изложены, следуя [15, 102, 120, 123, 158].

С экологической точки зрения загрязнение поступает в экосистему. Поступление загрязнений изменяет функционирование экосистемы. Изменяются потоки энергии и вещества, продуктивность, численность популяций и т. п. Загрязнение природной среды может происходить от естественных источников (наводнение, извержение вулкана, падение метеорита и т. д.) и в результате человеческой деятельности. Таким образом, следует различать природные и антропогенные загрязнения. Загрязнение может иметь физическую, химическую, биологическую природу.

Приведем определение загрязнения, которое было сформулировано группой экспертов по научной проблеме глобального загрязнения морей при ООН. Хотя определение касается морей, оно хорошо, на наш взгляд, раскрывает сущность понятия загрязнения. «Загрязнение означает внесение человеком прямо или косвенно, веществ или энергии в морскую среду, в результате чего возникают такие пагубные последствия, как ущерб живым ресурсам, опасность для здоровья человека, помехи морской деятельности, изменение полезных свойств водного объекта».

В биологическом энциклопедическом словаре загрязнение определяется следующим образом. К загрязнениям биосферы относятся как поступление и накопление стойких загрязняющих веществ, которые почти не разрушаются в природных средах (например, ДДТ), так и веществ, имеющих естественные механизмы размножения и усвоения (например, удобрения) в количествах, превышающих способность биосферы к их переработке и нарушающих сложившиеся в ходе длительной эволюции природные системы и связи в биосфере и подрывающих способность природных компонентов к саморегуляции.

Физическое загрязнение связано с изменением физических параметров: тепловых, световых, электромагнитных, радиационных, звуковых и др.

Тепловое загрязнение обычно связано с промышленными выбросами теплой воды и различных газов. Тепловое загрязнение водосмов вызывает их эфтрофикацию, изменяется видовой состав в водоеме. Тепловое загрязнение атмосферы может происходить также в результате поступления в атмосферу парниковых газов. Такое тепловое загрязнение носит вторичный характер.

Хорошо известный вид физического загрязнения — шумовое загрязнение [34, 146]. Развитие транспорта, промышленности обуславливает шумовое загрязнение, проявляющееся в превышении естественного уровня шума, изменении спектра шума, появлении новых частот звуковых колебаний, не характерных для окружающей среды. Фактически любые звуки, генерируемые неприродными источниками, могут рассматриваться как шумовые, поскольку подобные источники отсутствовали в период эволюции человека. Шумовое загрязнение снижает производительность труда, вызывает различные заболевания. Исследования показывают, что сильный шум оказывает на организм человека действия, подобные действию наркотиков. Согласно данным медиков шумовое загрязнение сокращает продолжительность жизни на 8–12 лет. В районах аэропортов в радиусе до 15 км зарегистрировано значительное ухудшение здоровья населения. При взлете самолеты типа ИЛ-76, ИЛ-86 создают шум, превышающий почную норму в радиусе до 40–50 км. В РФ 1,5 млн человек страдает от авиационного шума.

Электромагнитное загрязнение возникает в результате работы мощных электроустановок, линий электропередач, радиопередающих устройств, в том числе мобильных средств связи. Действие электромагнитного излучения во всем его спектре на человека еще не исследовано. В литературе описаны многочисленные факты отрицательного действия искусственных электромагнитных полей на человека и способность человека ощущать эти поля. Например, некоторые люди, находясь на расстоянии в десятке метров от линии электропередачи, способны определять момент ее включения или выключения. Электромагнитное излучение оказывает отрицательное воздействие не только на человека. Под линиями электропередачи напряженность электрических и магнитных полей значительно превышает фоновый уровень. Установлен факт отрицательного влияния электромагнитного излучения на структуру почвы, высокий уровень подобного загрязнения наблюдается при прокладке линий электропередач

над сельхозугодьями. В России сохраняется тенденция роста электромагнитного и шумового загрязнений. Таблица 19.1 даст представление о распространенности этих видов загрязнений.

Таблица 19.1. Число объектов, которые не удовлетворяли санитарно-гигиеническим нормам по воздействию шума и электромагнитных полей в 1997 г. [94]

Категория объекта	Число обследованных объектов/Из них не отвечает санитарно-гигиеническим нормам, %	
	шум	электромагнитные загрязнения
Промышленные предприятия	13 663/53	3 601/27,3
Коммунальные объекты	6 345/31,6	2 354/24,4
Транспорт	2 197/55,1	1 058/12,3

Химическое загрязнение представляет собой поступление в экосистему тех или иных веществ, количественно или качественно чуждых экосистеме. При этом изменяются не только химические свойства среды, но может нарушиться функционирование экосистемы. Человек поставляет в окружающую среду соединения, которых раньше в ней не было. Поэтому отсутствует естественный (природный) путь их нейтрализации. Примерами химического загрязнения являются загрязнения тяжелыми металлами, пестицидами, хлорбифинилами и др. Отрицательные влияния химических загрязнений на метаболизм живых организмов называют «экологическими ловушками». В качестве такой ловушки можно упомянуть явление накопления метилртути в организме человека (болезнь Минамата — по названию местности в Японии, где эта болезнь была впервые обнаружена). Отходы производства, содержащие метилртуть, сбрасывались в залив, откуда с морепродуктами, выловленными рыбаками, поступали в организм человека. Более 40 лет понадобилось природе для того, чтобы устранить последствия сбросов ядовитых отходов в залив. Только в 1998 г. местным рыбакам была разрешена добыча морепродуктов в этом заливе.

Накопление химических веществ в пищевой цепи называется концентрированием в пищевой цепи, или бионакоплением. Особенно опасно это явление в отношении некоторых устойчивых

к разложению пестицидов и радионуклидов, которые используются в небольших концентрациях. Например, представим себе поступление ДДТ в водоем. По трофической цепи сначала ДДТ передается продуцентам (водным растениям), затем рыбе (травоядной), далее хищной рыбе и, наконец, хищной птице (скопа). При переходе с первого на второй трофический уровень концентрация ДДТ возрастает в 250 раз, при переходе со второго на третий — еще в 1200 раз, а с третьего на четвертый — еще в 1800 раз. Сильное влияние ДДТ оказывает на популяции птиц. Поступление ДДТ в организм пернатых нарушает образование яичной скорлупы, что нарушает развитие птенцов и может привести к сокращению или даже гибели популяции. Это явление хорошо исследовано, например, на популяции розовых пеликанов в Калифорнии. Подобным образом следовые количества радиоактивных элементов, поступающих в водоемы с предприятий атомной промышленности, концентрируются в тканях рыб и птиц и представляют опасность для человека.

Биологическое загрязнение является не менее опасным, чем химическое загрязнение. Эпидемии гриппа, других болезней являются примерами проявления микробиологического загрязнения, вызванного микроорганизмами. Распространение патогенных организмов со сточными водами часто являлись и продолжают являться причинами эпидемий.

Случайное переселение животных или растений в экосистемы может привести к значительному нарушению их функционирования. Колорадский жук, завезенный из Америки в Европу, нанес колоссальный вред пасленовым растениям. Читатели, вероятно, знакомы с множеством подобных примеров.

Разделение загрязнений на физические, химические, биологические имеет определенную условность и ограниченность. Например, тепловое загрязнение водоема, возникающее при использовании воды для отвода избыточного тепла, относится к физическому загрязнению. Однако тепловое загрязнение приводит к интенсификации и перестройке процессов биотической компоненты экосистемы, нарушаются процессы переноса химических веществ, изменяется видовой состав. Таким образом, возникает вторичное химическое и биологическое загрязнение.

Другой пример. Поступление нефтепродуктов на поверхность водоема — химическое загрязнение. Но распределение нефтепродуктов по поверхности нарушает процессы газообмена, испарения, теплообмена водоема с атмосферой. Поверхностные пленки изменяют параметры ветровых волн, как следствие происходит

гашение или ослабление коротковолновых составляющих волнового спектра. Изменения параметров поверхностных волн в свою очередь изменяют структуру приводного слоя атмосферы и приповерхностного слоя водоема — изменяются профили скорости ветра и течения, вертикальные распределения пульсаций. При этом изменяются потоки энергии и импульса между атмосферой и водоемом, то есть имеет место изменение динамического взаимодействия пограничных слоев атмосферы и водоема. Напомним, что в основе этого сложного каскада изменений физико-химических процессов лежит химическое загрязнение водной поверхности.

Способность природной среды к самоочищению зависит от характеристик загрязняющего вещества и биоценоза. При загрязнении, например, водных объектов загрязняющие вещества можно подразделить на следующие группы [120]. В первую группу входят консервативные загрязняющие вещества, которые не разлагаются или разлагаются в природной среде очень медленно. Снижение концентрации консервативных загрязняющих веществ происходит за счет процессов разбавления, массопереноса, сорбции, бионакопления и др. Самоочищение в этом случае имеет кажущийся характер, так как происходит только перераспределение и рассеяние консервативных загрязняющих веществ в окружающей среде. Локальное загрязнение уменьшается за счет расширения области загрязнения. Общее количество загрязняющих веществ не изменяется. Во вторую группу относятся биогенные загрязняющие вещества, которые участвуют в биологическом круговороте. Самоочищение природной среды происходит за счет биохимических процессов.

К третьей группе могут быть отнесены водорастворимые вещества, не участвующие в биологическом круговороте. Самоочищение от этих загрязняющих веществ происходит путем химической и микробиологической трансформации.

Реакция экосистемы на внесение разного вида загрязняющих веществ в экосистему будет различной. При увеличении концентрации загрязняющих веществ, участвующих в биологическом круговороте, наблюдается первоначальное увеличение биопродуктивности экосистемы, при дальнейшем росте концентрации загрязняющих веществ происходит падение продуктивности и, возможно, гибель экосистемы.

При поступлении в экосистему загрязняющих веществ, не имеющих природных путей утилизации, с ростом концентрации загрязняющего вещества происходит падение биопродуктивности экосистемы и ее гибель.

Антропогенные загрязнения имеют, как правило, локальный характер поступления в среду. Распределение по большей территории происходит за счет множественности путей миграции.

Загрязняющие вещества, поступающие в атмосферу, участвуют в глобальной атмосферной циркуляции. Осаждение атмосферных загрязняющих веществ на поверхность водных объектов приводит к их загрязнению. Осаждение атмосферных загрязнений на поверхность растений вызывает загрязнение биоты (вскорневое поступление загрязнений).

Загрязняющие вещества, поступившие в водный объект, участвуют в циркуляции водной массы. За счет испарения воды может происходить загрязнение атмосферы, переход загрязненной воды в почву или биоту вызывает их загрязнение.

Подобным образом можно перечислить, как загрязняющие вещества, поступившие первоначально в биоту или на поверхность суши, вызывают загрязнение атмосферы и гидросферы. Беглое рассмотрение процессов миграции загрязняющих веществ показывает, что физические процессы массопереноса играют важнейшую роль в распространении загрязнений. Особенно велика роль физических механизмов на границах раздела фаз, в пограничных слоях.

Множественность путей миграции загрязняющих веществ приводит к необходимости комплексного подхода к изучению этого процесса. Решить задачу переноса загрязнений только в рамках изучения физических, химических или биологических процессов невозможно.

Упомянем, что в зависимости от масштабов распределения загрязнений выделяют глобальные, региональные и локальные загрязнения. Глобальные загрязнения называют также биосферными. Примерами глобальных загрязнений служат загрязнения озоноразрушающими веществами атмосферы, загрязнение Мирового океана нефтепродуктами, радиоактивное загрязнение, загрязнение ДДТ биосферы. (ДДТ обнаружен в жировых тканях тюленей в Арктике и пингвинов Антарктиды.) Загрязнение околоземного пространства в результате освоения Космоса также является примером глобального загрязнения [91, 92].

С начала космической эры было запущено около 24 000 объектов, из них 16 000 уже прекратили свое существование, остальные еще находятся на орбитах. Из них не более 5% приходится на действующие космические аппараты, остальные же объекты представляют собой неработающие космические аппараты. В настоящее время в околоземном космическом пространстве находится от 6000 до 10 000 объектов искусственного происхождения

размером более 10 см. За ними ведутся наблюдения наземными радиолокационными станциями, они внесены в каталоги. По оценкам в околоземном пространстве находится несколько десятков тысяч частиц размером от 1 до 10 см и до 35 млн. частиц размером 0,1–1 см [91, 92]. Главные источники этих объектов — взрывы космических аппаратов и ракет-носителей. Общая масса космического мусора составляет 3 000–3 500 тонн. В настоящее время опасность столкновения низкоорбитальных космических кораблей с частицами искусственного происхождения выше вероятности столкновения с частицами естественного происхождения. К настоящему времени уже известны случаи столкновения космических аппаратов с космическим мусором. Например, в 1996 г. спутник «CERISE» столкнулся с фрагментом ракеты «Ariane». В процессе полетов космические корабли выделяют большое число частиц размером менее 1 мм, которые относят к микрочастицам. При достижении некоторой критической плотности потока космических частиц искусственного происхождения возможен лавинообразный процесс их размножения за счет столкновения фрагментов между собой. Освоение космического пространства приводит также к загрязнению верхней атмосферы и земной поверхности продуктами сгорания топлива (химическое загрязнение), фрагментами космических аппаратов, радиоактивному загрязнению околоземного космического пространства в результате использования бортовых ядерных источников, электромагнитному загрязнению. Во время запуска космического корабля типа «Шаттл» в верхние слои атмосферы выбрасывается более 130 т хлора.

Работа наземных радиопередатчиков, промышленных объектов вызывает локальное электромагнитное загрязнение. При этом происходит также загрязнение околоземного космического пространства в длинноволновом и коротковолновом диапазонах. Хорошо известен «эффект уикенда», заключающийся в том, что в выходные дни, когда большинство промышленных предприятий Европы и Северной Америки не работают, наблюдается уменьшение интенсивности электромагнитного излучения в околоземном космическом пространстве. Суммарный вклад искусственных источников электромагнитного излучения составляет, по разным оценкам, от 1 до 10% от вклада естественных источников. Локальная напряженность искусственных полей может превышать напряженность естественных полей на 1–3 порядка.

В случае регионального загрязнения наблюдается превышение естественного средноклиматического уровня концентрации

тех или иных веществ или возникновение новых, не характерных для нас физических, химических, биологических агентов в окружающей среде в пределах значительных областей, но не всей поверхности Земли.

В случае локального загрязнения происходит загрязнение только вокруг промышленного объекта, города, животноводческой фермы, в части водоема и т. п.

Нормирование загрязнений

Важнейшей характеристикой загрязняющих веществ является предельно допустимая концентрация (ПДК), определяющая максимальную концентрацию загрязнения, отнесенную к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного воздействия. Иногда загрязнение в меньших концентрациях может оказывать более сильное воздействие на окружающую среду, чем на человека. В таких случаях нормирование проводят исходя из порога действия не на человека, а на окружающую среду. Первые критерии ПДК для загрязнений в атмосфере были разработаны в СССР еще в 30-е годы.

Действие яда на организм может иметь форму острого или хронического отравления. Одно и то же вещество вызывает ту или иную форму отравления при различных концентрациях или дозах. Концентрация — это количество загрязнения в объеме среды, доза — загрязнение в единице массы человека. Некоторые вещества вызывают только острые отравления. Вопросы токсичности тех или иных веществ исследуются в промышленной токсикологии.

Нормирование загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, воде, почве существенно различается между собой, поэтому рассмотрим их отдельно.

Нормирование загрязняющих веществ в атмосфере

ГОСТ определяет изменение свойств в атмосфере в результате наличия в ней примесей как загрязнение. К примесям относятся не только токсичные, но и нетоксичные вещества, изменяющие свойства атмосферы. Наиболее характерными видами воздействия загрязнений на организм человека являются токсическое (резорбтивное) и рефлекторное (органолептическое) воздействия. Исходя из этого для загрязнений в воздухе устанавливаются два норматива. Максимальная разовая концентрация ПДК_{мр} устанавливается для предупреждения у человека рефлекторных реакций (ощущение запаха, световой чувствительности глаз,

биоэлектрической активности головного мозга). Среднесуточная предельно допустимая концентрация $\text{ПДК}_{\text{сс}}$ устанавливается для предупреждения резорбтивного воздействия, которое может иметь общетоксическое, канцерогенное, мутагенное воздействие. Под разовым воздействием понимается 20-минутное воздействие. Многие вещества обладают как рефлекторным, так и резорбтивным действием. Если рефлекторное действие начинается при меньшей концентрации, чем резорбтивное, то считают $\text{ПДК}_{\text{мр}} = \text{ПДК}_{\text{сс}}$. Если при более низкой концентрации начинается токсическое действие, то $\text{ПДК}_{\text{мр}} = (2-10) \cdot \text{ПДК}_{\text{сс}}$. В производственных помещениях для всех веществ устанавливается только $\text{ПДК}_{\text{мр}}$.

Человек как биологический вид имеет везде одинаковую экологическую нишу. Но требовать одинаковых значений ПДК на рабочем месте (рабочей зоне — РЗ), промышленном предприятии (ПП), а также в зоне жилья не только неразумно, но и очень дорого. Поэтому вводят раздельное нормирование, при котором для различных участков устанавливаются разные ПДК. Для загрязнений атмосферного воздуха устанавливаются ПДК в рабочей зоне ($\text{ПДК}_{\text{рз}}$), и в населенном пункте — $\text{ПДК}_{\text{ав}}$. $\text{ПДК}_{\text{рз}}$ устанавливается из условий, что здоровью человека не будет нанесен ущерб при его работе в течение всего трудового стажа при установленной продолжительности рабочего дня. Под $\text{ПДК}_{\text{ав}}$ понимается максимальная концентрация примеси, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при воздействии за время жизни человека не оказывает на него вредных воздействий. Очевидно, что $\text{ПДК}_{\text{рз}}$ и $\text{ПДК}_{\text{ав}}$ существенно различаются. Например, для метилмеркаптана $\text{ПДК}_{\text{рз}} = 0,8 \text{ мг/м}^3$, $\text{ПДК}_{\text{ав}} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ мг/м}^3$. На территории промышленного предприятия обычно устанавливается $\text{ПДК}_{\text{ин}}$, равная $0,3 \text{ ПДК}_{\text{рз}}$. Нормативные документы в конце 80-х г. уже содержали перечень ПДК для более чем 700 веществ.

Если на территории находится несколько источников загрязнений одного вида, то должно выполняться следующее условие:

$$\sum_{i=1}^n C_i \leq \text{ПДК}_{\text{ав}},$$

где C_i — наибольшая концентрация вредного вещества в атмосферном воздухе населенного пункта от i -го источника, n — число источников, поставляющих данное вредное вещество в воздух.

Нормирование загрязняющих веществ в водных объектах

В водосеме вода намного более жестко локализована по сравнению с атмосферным воздухом. Водный объект может использоваться для водопользования — в этом случае вода используется без изъятия из водосема (рыбное хозяйство, водный транспорт, отдых на воде). В случае водопотребления вода изымается из водоема и возвращается в него (полностью или частично) в загрязненном состоянии.

Водосем считается загрязненным, если показатели качества воды изменились в результате антропогенного воздействия, и вода стала непригодной хотя бы для одного из видов водопользования или водопотребления. Степень предельно допустимого загрязнения воды определяется предельно допустимой нагрузкой, которая зависит от вида использования водного объекта. Таким образом нормирование загрязнений в водном объекте проводится с учетом водоиспользования. Водный объект с полностью разрушенной экосистемой не считается загрязненным, если он не применяется для водоиспользования.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в водном объекте — это такая концентрация вещества, при превышении которой вода становится непригодной для одного или нескольких видов водоиспользования. Свойства воды в водных объектах должны соответствовать нормам в водотоке, находящемся на расстоянии 1 км выше ближайшего по течению места водоиспользования. Для непроточных водоемов эти условия должны удовлетворяться в радиусе 1 км от пункта водоиспользования.

Раздельное нормирование качества воды связано с категориями водоиспользования. В зависимости от категории водоиспользования к качеству воды предъявляются различные требования. Выделяют две категории водоиспользования:

- использование для нужд населения,
- использование для целей рыбного хозяйства.

Первая категория подразделяется на хозяйственно-питьевое и культурно-бытовое. Вторая категория делится на три группы, в зависимости от целей рыбного хозяйства (места нереста, охранные зоны рыбного хозяйства, воспроизводство ценных видов рыб). ПДК для указанных категорий существенно различаются. Например, ПДК для аммиака в водоемах 1-й категории составляет 2 мг/л, а для водоемов 2-й категории он равен 0,05 мг/л. ПДК для нефтепродуктов в водоемах 1-й категории равен 0,3 мг/л, а в

водоемах 2-й категории — 0,05 мг/л. Для водоемов 1-й категории установлены ПДК более чем для 1700 веществ, для водоемов 2-й категории — почти для 1000.

Если водный объект имеет многофункциональное потребление, используется показатель вредности, отражающий приоритетность требований к качеству воды, он является лимитирующим показателем.

Загрязнение воды может быть обусловлено не только токсичными веществами, но и изменением органолептических показателей (запах воды изменяется от поступления нетоксичных, но дурно пахнущих веществ) и других физико-химических характеристик, к ним относятся: содержание взвешенных веществ, минеральный состав, растворимый кислород, температура, окраска, показатель pH и др.

Приведенное описание показывает, что нормирование загрязнений в воде является очень сложной проблемой. Современная система нормирования не учитывает особенностей водного объекта как экосистемы. В настоящее время необходимо перейти к разработке нормативов предельно допустимой экологической нагрузки на водные объекты, рассматривающие их как экосистемы.

Нормирование загрязняющих веществ в почве

Нормирование загрязняющих веществ в почве более сложно, чем в атмосферном воздухе или в водных объектах. Это обусловлено множественностью путей поступления загрязняющих веществ из почвы в человеческий организм. Нормирование загрязнений в почве проводят по трем направлениям:

- 1) нормирование загрязняющих веществ в пахотном слое сельскохозяйственных угодий,
- 2) нормирование загрязняющих веществ на территории предприятий,
- 3) нормирование загрязняющих веществ на территории жилых районов.

В пахотном слое почвы ПДК_п устанавливается исходя из следующих соображений. Во-первых, ПДК должна быть такой, чтобы остаточная концентрация в продуктах питания была ниже предельно допустимой концентрации в продуктах питания ПДК_{пр}. Во-вторых, концентрация в почве должна быть такой, чтобы летучие загрязняющие вещества, поступающие из почвы в воздух, не превышали ПДК_{ав} атмосферного воздуха.

В-третьих, концентрация в почве должна быть такой, чтобы поступление загрязнений в грунтовые воды не превышало ПДК для водных объектов. И, наконец, концентрация загрязнений не должна нарушать процессы самоочистки в почве.

ПДК_п устанавливаются в основном для ядохимикатов, используемых для борьбы с вредителями, сорняками. За ПДК_п принимается минимальное значение концентрации, определенное из вышеуказанных критериев.

Нормирование загрязнений на территории предприятий проводят исходя из ряда показателей, таких как размеры территории, токсичность и химическая активность соединений в отходах.

Санитарное состояние почвы в населенных пунктах оценивается по ряду гигиенических параметров: санитарному числу, равному отношению содержания белкового азота к органическому, числу колититра, числу личинок мух и т. д.

При нормировании загрязняющих веществ необходимо иметь в виду, что многие вещества обладают сходным токсичным действием, т. е. в этих случаях суммарная концентрация таких веществ может превышать предельно допустимую концентрацию для отдельных веществ. Некоторые загрязняющие вещества обладают синергетическим эффектом, то есть токсичность одного в присутствии другого может многократно возрастать. Эффект суммации действия загрязняющих веществ необходимо учитывать при сложном спектре загрязняющих веществ.

Предельно допустимые выбросы

Для каждого источника загрязнения атмосферы устанавливаются предельно допустимые выбросы (ПДВ). В водосмы загрязняющие вещества поступают в виде сбросов, а если сбросы организованы, т. е. поступают через специальные устройства, то они называются «выпуски».

Предельно допустимые выбросы и предельно допустимые сбросы предприятий устанавливаются из расчетов, чтобы суммарная концентрация с учетом работы других предприятий и сбросов населенного пункта не превышала ПДК.

Изложенные выше подходы нормирования загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, водоемах, в конечном счете, и в почве используют принципы раздельного нормирования. Использование этого принципа приводит к тому, что концентрация меньше ПДК наблюдается только в ограниченной части территории. Вне этих зон концентрация загрязняющих веществ может быть много выше ПДК. На таких участках происходит разрушение экосистем. Подобное нормирование загрязняющих

веществ, обеспечивая сохранение потребительских свойств и характеристик в зоне использования ее человеком (в части экосистемы), наносит экосистеме в целом значительный вред, который может проявляться в снижении продуктивности экосистемы или ее полного разрушения.

Наряду с изложенным выше подходом, в мировой практике достаточно широко (в основном в США и Западной Европе) распространено нормирование загрязняющих веществ, базирующееся на понятии ассимиляционного потенциала территории. В этом случае поступление загрязняющих веществ от предприятий должно быть таким, чтобы эти поступления не нарушили экосистему в целом. Ассимиляционный потенциал как раз и показывает, какое количество загрязняющих веществ может поглотить та или иная экосистема без ущерба для своего состояния. Определив ассимиляционный потенциал территории, далее можно установить предельные нормы на выбросы и сбросы загрязняющих веществ отдельными предприятиями. Эти нормы могут пересматриваться с учетом сезонных условий и технических возможностей предприятий. Однако определение ассимиляционной емкости экосистемы является довольно сложной задачей.

Мониторинг биосферы

Под мониторингом окружающей среды понимают комплекс мероприятий по определению степени загрязненности экосистем или элементов биосферы, наблюдению за нарушениями экологического равновесия.

Различают следующие виды мониторинга: глобальный, национальный, региональный, локальный.

Иногда под мониторингом понимают информационную систему наблюдения и анализа состояния природной среды, прежде всего наблюдения уровней загрязнения и эффектов, вызываемых ими в биосфере или ее частях. Мониторинг представляет собой многоцелевую информационную систему, информирующую о состоянии биосферы, о степени антропогенного воздействия на окружающую среду, об источниках антропогенного воздействия. Мониторинг как система наблюдения и контроля включает в себя наблюдение, оценку состояния и прогноз возможных изменений состояния биосферы или ее элементов. При этом нужно производить измерение таких характеристик среды, на основе которых можно получить оценку состояния окружающей среды. Для построения прогноза состояния необходимо знание закономерностей изменения состояния окружающей среды под действием

тех или иных факторов. Ясно, что выбор измеряемых параметров, проведение измерений, построение прогнозов представляют собой сложные задачи. Мониторинг иногда подразделяют на геофизический и биологический мониторинг. В геофизическом мониторинге проводятся наблюдения за абиотической частью биосферы, в биологическом — за биотической частью биосферы.

Наблюдения за антропогенными изменениями часто проводятся на фоне значительных естественных природных изменений. Например, необходимо выявить антропогенный вклад в изменения озонового слоя на фоне его сильной природной изменчивости. Согласно господствующей точке зрения образование озоновых дыр обусловлено расширением производства озоноразрушающих веществ, т. е. озоновые дыры имеют антропогенный характер. Для устранения последствий антропогенного воздействия на озоновый слой уже введены ограничения на производство ряда озоноразрушающих веществ. Планируется расширить перечень запрещенных озоноразрушающих веществ, предполагается ввести ряд дополнительных ограничительных мер на межгосударственном уровне. Согласно другой, менее распространенной точке зрения, которой однако, придерживаются многие геофизики, давно исследующие озоновый слой, современное состояние озонового слоя, его изменение обусловлено, прежде всего, естественными природными процессами. Проблема озонового слоя подробно рассматривается в следующей главе.

Другим примером, показывающим, как сложно бывает оценить антропогенный вклад в изменчивость природной среды,

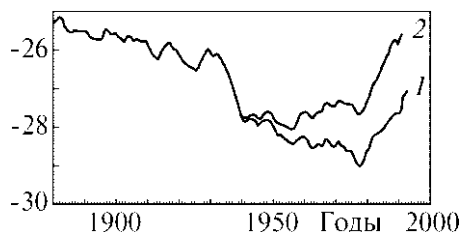


Рис. 19.1. Данные наблюдений уровня Каспийского моря (1) и восстановленные с учетом исключения антропогенного изъятия стока (2) [141]

является изменение уровня Каспийского моря (рис. 19.1). Наблюдавшееся в предыдущие десятилетия падение уровня моря объясняли, прежде всего, уменьшением речного стока. Сток в Каспий Волги, Урала, других рек с 50-х гг. действительно уменьшился. Для частичной компенсации потерь воды за счет испарения было предложено перекрыть мелко-

водный залив Кара-Богаз-Гол, который фактически играл роль испарительного бассейна. Залив перекрыли, однако начавшийся подъем уровня Каспия привел к затоплению значительных

территорий вокруг Северного Каспия. Разрушение плотины и возобновление сброса каспийской воды в залив Кара-Богаз-Гол не помешало дальнейшему росту уровня. Начиная с 1997 г. подъем уровня прекратился, сейчас началось очередное медленное падение уровня. Все это свидетельствует о том, что реально природные причины изменения уровня Каспийского моря при принятии решения о строительстве плотины были неизвестны. Следует упомянуть, что во временных рядах уровней Каспийского моря, а также крупнейших озер Европы и Северной Америки наблюдаются колебания с 30-летними циклами, которые позволяют предположить наличие связей между колебаниями солнечной активности и изменением колебаний уровня водоемов.

В настоящее время большинство ученых склоняется к мнению, что изменение уровня Каспийского моря обусловлено тектоническими процессами и глобальными изменениями климата. Исторический анализ показал, что для Каспийского моря в прошлом были характерны изменения уровня моря до десятков метров.

Для изучения изменчивости уровня бессточных водоемов (к ним относится и Каспийское море) применяются модели, основанные на анализе линейного уравнения водного баланса. Так уровень воды отражает интегральное влияние притока, осадков, испарения, реакцию термодинамической системы водосма, его исследование необходимо вести на основе вероятностных характеристик водного баланса. Прогнозы изменения уровня Каспийского моря, построенные на основе подобных моделей, не оправдались. Более перспективными для получения прогноза изменения уровня являются модели, в которых учитываются внутренние нелинейные механизмы, внешние силы рассматриваются в виде случайных внешних сил, водоем в целом представляется неравновесной системой в духе синергетики. Роль диссипативного фактора может играть испарение, которое может усиливать внешнее воздействие. При таком подходе водоемы имеют несколько равновесных уровней воды, переход между ними является не прямым следствием климатических изменений, а отражает собственные динамические процессы в системе, происходящие под внешним воздействием.

Приведенные примеры показывают всю сложность получения правильных прогнозов изменений окружающей среды, выделения антропогенного вклада на фоне сильной природной изменчивости.

В системе мониторинга можно выделить 3 уровня.

Санитарно-токсикологический мониторинг включает наблюдения за состоянием окружающей среды, за загрязнениями, за качеством водных объектов и т. д. Экологический мониторинг содержит наблюдения за изменениями в экосистемах, за биопродуктивностью экосистем. Экологический мониторинг объединяет геофизический и биологический мониторинг. Биосферный мониторинг включает наблюдения за глобальными изменениями в природе, общей циркуляцией атмосферы и океана, газовым обменом между ними и т. д.

Конечная цель мониторинга заключается в реализации мероприятий (пазываемых экологическим нормированием), направленных на ограничения антропогенного воздействия на экосистемы или биосферу в целом. Экологическое нормирование необходимо проводить с учетом множественности путей загрязнения и самоочищения элементов биосферы. Нормирование антропогенных воздействий проводится на основе оценок их влияния на природные системы. Важным моментом при обосновании экологического нормирования является поиск наиболее слабых или «критических» звеньев биосферы. При анализе адаптационных возможностей биосферы к антропогенным воздействиям важен учет экологического резерва, определяющего долю возобновляемых природных ресурсов, которую можно изъять из биосферы без нарушения ее основных свойств. Экологический резерв неразрывно связан с понятием устойчивости системы. Для нормального функционирования экосистемы (без потери ее устойчивости) антропогенные нагрузки не должны превышать предельно допустимые экологические нагрузки.

Часто изменения экосистемы характеризуются сравнением значений того или иного показателя ее состояния с фоновым значением этого же показателя, которое определяется в подобной экосистеме, ранее не подвергавшейся локальному антропогенному воздействию. Для определения подобных фоновых показателей нужны заповедники.

Важнейшим показателем при определении предельных нагрузок на окружающую среду является понятие качества среды. Качество среды — совокупность параметров, удовлетворяющих условиям существования человека (экологическая пища) и условиям существования человеческого общества. В качестве критериев качества среды могут быть использованы биологическая продуктивность экосистемы, соотношения видов, состояния трофических систем и т. п. В США качество среды характеризуется системой специальных баллов. Сумма баллов в том или ином регионе определяет качество среды.

В России проведением мониторинга занимается ряд организаций, перечислим главнейшие из них.

Министерство природных ресурсов координирует деятельность различных ведомств, организаций в сфере мониторинга, организует мониторинг источников антропогенного воздействия, растительного и животного мира, геологической среды, водохозяйственных систем, координирует работы по созданию экологических информационных систем.

Роскомгидромет организует мониторинг атмосферы, морей и вод суши, создает государственный фонд данных об источниках загрязнения окружающей среды.

Министерство обороны РФ занимается мониторингом источников загрязнения военных объектов, обеспечением организаций, занимающихся мониторингом, системами военной техники двойного применения.

В РФ мониторинг загрязнения окружающей среды ведет Государственная сеть наблюдения за состоянием и загрязнением окружающей природной среды. В рамках этой службы в 1997 г. наблюдения за загрязнением атмосферы воздуха проводились на 602 стационарных постах в 238 городах и 602 поселках, при этом измеряются концентрации от 5 до 25 веществ. Наблюдения за загрязнением поверхностных вод по гидрохимическим показателям проводились на 1132 водных объектах, отбор проб проводился в 1788 пунктах на 2454 створах. Наблюдения за загрязнением поверхностных вод по гидробиологическим показателям проводились на 120 водных объектах, отбор проб проводился в 156 пунктах. Наблюдения за загрязнением морской среды по гидрохимическим показателям ведутся в 602 пунктах на 11 морях. Сеть станций трансграничного переноса веществ включает только три станции. Пункты наблюдения за загрязнением почв расположены в 176 хозяйствах. В отобранных пробах определяется содержание 21 пестицида. Сеть комплексного мониторинга загрязнений природной среды и состояния растительности включает 30 постов и 131 станцию федерального уровня. Контроль загрязнения снежного покрова осуществляется в 484 пунктах. В систему фоновой мониторинга входит 7 станций комплексного фоновой мониторинга, которые расположены в биосферных заповедниках: Алтайском, Баргузинском, Центрально-Лесном, Воронежском, Приокско-Тerrasном, Астраханском, Кавказском. Сеть наблюдений за радиоактивным загрязнением содержит 1456 гидрометеостанций и постов.

Ежегодно в РФ издается доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации», кроме того, сокращенный вариант доклада обычно публикуется в газете «Зеленый мир», что делает его доступным для широкой общественности.

Например, из доклада «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1997 году» [98] следует, что в городах средние концентрации диоксида азота и сероуглерода превышают ПДК, формальдегида и бензапирена — 2 ПДК. В России 73% населения живет в условиях постоянного превышения ПДК в атмосферном воздухе в 5–10 раз. Средние за год концентрации какого-либо вещества превышают ПДК в 187 городах, в которых проживает 65,4 млн человек. В 66 городах максимальные разовые концентрации превышали 10 ПДК. В ряде городов основной вклад в загрязнения воздуха вносит автотранспорт. Например, в Москве в 1997 г. на долю автотранспорта приходилось 88% суммарного выброса загрязнений в воздушную среду всеми источниками. Рис. 19.2 показывает число граждан РФ, проживающих в условиях загрязненного воздуха.

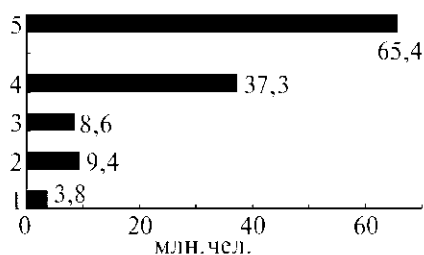


Рис. 19.2. Численность жителей в городах, находящихся под воздействием максимальных концентраций примесей в воздухе выше 10 ПДК (1 — взвешенные частицы, 2 — диоксид азота, 3 — бензапирен, 4 — всего) и под воздействием средних концентраций примесей выше ПДК [94]

В 1997 г. качество воды большинства водных объектов не отвечало нормативным требованиям. Наиболее распространенными загрязнениями водных объектов являются нефтепродукты, фенолы, соединения металлов, органические вещества. В последние годы из-за экономической ситуации сохраняется устойчивая тенденция сокращения водозабора, общего сброса использованных вод, однако при этом сброс загрязненных вод практически не изменился. В ряде регионов сброс загрязненных вод даже вырос за счет таких отраслей, как цветная металлургия, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность. При общем уменьшении водоотведения доля загрязненных вод возросла. Сложившаяся ситуация с загрязнением водных объектов объясняется недостаточной

эффективностью существующих устаревших очистных сооружений, резким сокращением введения в строй новых очистных сооружений. Большая часть воды, поставляемая населению РФ, берется из поверхностных источников. Высокое содержание хлоридов и сульфатов в питьевой воде приводит к росту заболеваний сердечно-сосудистой системы, распространению желчно-каменной болезни и другим заболеваниям.

В 1997 г. состояние земель в РФ продолжало оставаться неудовлетворительным. Более 20% сельскохозяйственных угодий переувлажнены, заболочены и засорены камнями; 43% содержат очень мало гумуса; 44% имеют повышенную кислотность.

Неблагоприятная экологическая ситуация в основных регионах РФ дает определенный вклад в неблагоприятную демографическую ситуацию, сложившуюся в России. Некоторые исследователи говорят о начале демографической катастрофы [3]. Снижается рождаемость, растет смертность, сокращается продолжительность жизни (за период с 1990 г. по 1994 г. уменьшилась с 69,2 до 64 лет). Ухудшается здоровье и растет смертность детей всех возрастов. За последние 5 лет заболеваемость новорожденных выросла в 2,8 раза. За период с 1990 г. заболеваемость у детей бронхиальной астмой выросла на 40%, болезней крови — на 35%, онкологических заболеваний — на 13%. Через 20 лет процент здоровых детей в популяции может уменьшиться до 15–20%. До 35% роста заболеваемости детей обусловлено загрязненностью атмосферного воздуха. Некоторые данные, иллюстрирующие сказанное, приведены на рис. 19.3–19.5.



Рис. 19.3. Естественное движение населения РФ (показатели на 1 тыс. чел.) [3]

Число умерших на 100 тыс. человек населения

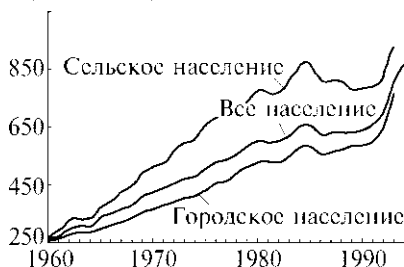


Рис. 19.4. Динамика смертности населения РФ от болезней системы кровообращения [3]

Вместе с тем, следует отметить, что на демографическую ситуацию и состояние здоровья населения определенное влияние оказывает общее экономическое и социальное положение в стране, которое существенно изменилось в последние годы.

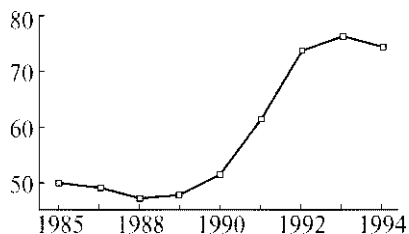


Рис. 19.5. Первичный выход на инвалидность населения РФ за 1985–1994 гг. (число случаев на 10 тыс. чел.) [3]

В последнее время важнейшим элементом системы мониторинга становятся геоинформационные системы (ГИС), которые являются мощным инструментом для сбора, передачи и хранения, анализа информации и выработки рекомендаций. ГИС обеспечивают сбор пространственно-распределенной информации и представление изменения ее

во времени, позволяют использовать картографические модели.

Наиболее емким источником информации для ГИС являются материалы дистанционного космического зондирования. В современных космических системах используется аппаратура с высоким разрешением (до 0,1 м) и имеющая несколько спектральных диапазонов, что обеспечивает получение больших объемов разнообразной информации, в том числе в оперативном режиме и в условиях облачности.

Хорошо известным примером использования ГИС являются получение и представление результатов голосования по регионам страны. Например, использование ГИС для сбора и анализа пространственно-распределенной информации, создания баз данных, картирования в озероведении рассмотрено Показесвым К. В. и Филатовым Н. Н. [104].

Системы, использующие космические аппараты, могут быть применены для мониторинга и прогнозов природных катастроф и техногенных аварий.

Экологическая экспертиза

Проводя те или иные мероприятия, связанные с воздействием на окружающую среду, необходимо еще на предпроектной стадии оценить возможные последствия реализации предполагаемого проекта. Для этого проводится экологическая экспертиза — комплекс мероприятий, предназначенных для проверки соответствия хозяйственной деятельности (или иной деятельности) требованиям экологической безопасности общества. Экологическая

экспертиза является обязательной мерой охраны окружающей природной среды, предшествующей принятию хозяйственного решения. Цель экологической экспертизы заключается в том, чтобы предотвратить или минимизировать ущерб природной среде.

Экологическая экспертиза призвана дать оценку влияния сооружения объекта на экологические ниши живых организмов, находящихся в зоне воздействия объекта, на совокупность экологических факторов и их изменение в результате воздействия объекта. В результате экспертизы должны быть также получены оценки изменения ландшафтов, структуры экологических систем, изменения популяций живых организмов, оценки возможных глобальных последствий.

Все это указывает, что экологическая экспертиза является комплексом мероприятий различного уровня сложности. Она включает экспертные оценки, математическое и физическое моделирование экосистем или отдельных процессов в них, натурные эксперименты.

Государственная экологическая экспертиза (ГЭЭ) проводится экспертными комиссиями, которые создаются Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды с целью проверки соответствия хозяйственной деятельности требованиям экологической безопасности. Государственная экологическая экспертиза осуществляется на принципах обязательности, научной обоснованности, законности ее выводов и рекомендаций, независимости, гласности, вневедомственности и широкого участия общественности.

Эти принципы должны обеспечить действенность экспертизы. Нарушение их приводит к негативным последствиям, подрывает у людей веру в целесообразность ее проведения. Ярким примером нарушения принципов проведения Государственной экологической экспертизы является организация работ по сооружению высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург–Москва. Дорогостоящие проектные работы в этом случае начались с нарушением основных принципов ГЭЭ — гласности, участия общественности, вневедомственности и независимости экспертов. Широко и подробно ситуация вокруг строительства высокоскоростной магистрали освещается на страницах всероссийской экологической газеты «Зеленый мир».

Другим примером подобного рода является сооружение дамбы для защиты Санкт-Петербурга от наводнений.

Государственной экологической экспертизе подлежат:

- проекты генеральных планов застройки городов;
- проекты на строительство, реконструкцию, развитие или ликвидацию предприятий;
- требования к новой технике, материалам, веществам и т. п.

Важной формой экологической экспертизы является общественная экспертиза. Для того чтобы общественная экспертиза стала юридически обязательной, она должна быть утверждена органами государственной экспертизы.

Наряду с ГЭЭ и общественной экологической экспертизой выделяют оценку воздействия на окружающую среду (ОВОС). ОВОС предназначена, прежде всего, на выявление недостатков проекта, принятие мер по улучшению экологических показателей технического задания.

Принципы экологической экспертизы и оценки воздействия на окружающую среду закреплены в законах РФ «Об охране окружающей природной среды» и «Об экологической экспертизе».

ГЭЭ, ОВОС и общественная экологическая экспертиза дополняют друг друга и являются разными сторонами экологической экспертизы.

При проведении экологической экспертизы основное внимание уделяется анализу технического обоснования проекта и оценке экологических последствий его реализации. Уменьшение экологических последствий может значительно увеличить первоначальную стоимость проекта. Например, проект прокладки Транс-Аляскинского трубопровода дорабатывался 4 года, стоимость проекта выросла с 900 млн до 5 млрд долларов. При экспертизе целесообразно сравнивать проекты с лучшими образцами, имеющими минимальное экологическое воздействие на окружающую среду.

Значительные сложности возникают при оценке качества природной среды и прогноза ее изменения под воздействием объекта. Эти сложности, в частности, обусловлены небольшим объемом стандартных измерений, редкостью расположения гидрометеорологических станций. В России предельно допустимые концентрации (ПДК) установлены более чем для 1000 видов веществ, загрязняющих воздух. Однако при проведении стандартных гидрометеорологических измерений индекс загрязненности

атмосферы определяется по 5 загрязняющим веществам, концентрация которых наибольшая. Аналогично индекс загрязненности вод J рассчитывается только по 6 показателям:

$$J = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \frac{C_i}{\text{ПДК}_i},$$

где C_i — концентрация i -го загрязняющего вещества и его ПДК $_i$.

Для комплексной оценки качества природной среды используется биомониторинг, который основан на высокой чувствительности ряда животных и растений к загрязнениям.

В соответствии с ГОСТом на каждом предприятии должен быть экологический паспорт. При проектировке предприятия паспорт разрабатывает организация-проектировщик. Основой для разработки экологического паспорта являются:

- основные показатели производства;
- проекты расчетов предельно допустимых выбросов и предельно допустимых сбросов;
- разрешение на природопользование;
- техническая документация на газо- и водоочистные установки;
- нормативно-технические документы.

Экологические паспорта включают:

- общие сведения о предприятии;
- краткая природно-климатическая характеристика территорий;
- сведения об использовании земельных ресурсов;
- характеристика сырья;
- характеристика выбросов в атмосферу;
- характеристика использования воды;
- характеристика отходов.

Экологический паспорт предприятия нужен для оценки влияния выбросов на окружающую среду, определения размеров платы за природопользование, установление предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ, экспертизы проектов развития предприятий.

Мониторинг атмосферы

В России мониторинг загрязнения атмосферы ведет Государственная сеть наблюдения за состоянием и загрязнением окружающей природной среды. В рамках этой сети наблюдения за загрязнением атмосферы используется около 600 стационарных постов, измеряющих концентрации от 5 до 25 веществ. Рассмотрим функционирование сети мониторинга состояния атмосферы в городе на примере Москвы. Наряду с федеральной сетью наблюдений за состоянием атмосферного воздуха в Москве создана и с 1996 г. функционирует подсистема контроля качества атмосферного воздуха Единой системы экологического мониторинга г. Москвы.

Городская система мониторинга атмосферного воздуха включает в себя сеть автоматических станций контроля загрязнения атмосферы и единый информационно-аналитический центр, функции которого выполняет Государственное природоохранное учреждение «Мосэкомониторинг». Сеть автоматических станций контроля загрязнения атмосферы — это автоматизированная система, позволяющая в непрерывном режиме с частотой 1 раз в 4 секунды и автоматически усредняя за 20-минутный период, измерять содержание в воздухе основных загрязняющих веществ: оксида углерода (CO), диоксида и оксида азота (NO₂ и NO), суммарных углеводородов (C_xH_y), диоксида серы (SO₂), озона (O₃), аммиака (NH₃), ароматических и алифатических углеводородов. Кроме того, на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы проводятся измерения некоторых метеорологических параметров: скорости и направления ветра, давления, влажности и температуры.

Система мониторинга атмосферы Москвы постоянно расширяется и развивается. В 2003 г. на территории города было установлено 39 автоматических станций. Особое внимание уделяется крупным объектам городской инфраструктуры, способным оказать существенное влияние на экологическую обстановку отдельных городских территорий. Оценка качества атмосферного воздуха производится для широкого спектра загрязняющих веществ

путем сравнения измеренных концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК), анализа повторяемости (%) превышения ПДК по отдельным веществам, расчету индекса загрязнения атмосферы — ИЗА₅ (рассчитанного по 5 приоритетным загрязняющим веществам: формальдегиду, озону, оксиду азота, диоксиду азота и оксиду углерода, представляющим собой сумму концентраций выбранных загрязняющих веществ в долях ПДК).

Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе определяется выбросами автотранспорта, промышленных предприятий, предприятий теплоэнергетики, городского хозяйства и метеорологическими условиями. Выхлопные газы автомобилей поступают в атмосферу на уровне человеческого роста и представляют значительно большую опасность для здоровья населения по сравнению с промышленными источниками, где выбросы вредных веществ осуществляются, как правило, на большой высоте (вентиляционные вытяжки на крышах зданий, трубы котельных, ТЭЦ и т. д.). По оценкам специалистов выбросы в атмосферу многих вредных веществ от автотранспортных средств преобладают над выбросами других источников. Например, автомобилями в воздушный бассейн г. Москвы выбрасывается до 95% СО, до 70–80% опасных органических веществ (формальдегид, ксилолы, бензол, толуол, нафталин, фенол, этилбензол), до 50% оксидов азота и диоксида серы.

Несмотря на то, что Москва является крупным промышленным городом с развитой транспортной инфраструктурой, анализ данных последних лет о содержании загрязняющих веществ в атмосферном воздухе показывает, что принципиально неверно говорить о постоянном загрязнении атмосферного воздуха на всей территории Москвы. Увеличение содержания загрязняющих веществ наблюдается только при определенных метеорологических условиях, способствующих накоплению загрязняющих веществ в атмосфере. При этом даже при неблагоприятных метеорологических условиях повышенные значения наблюдаются только на территориях, подверженных влиянию локальных антропогенных источников. Степень влияния неблагоприятных метеоусловий зависит от особенности рельефа городских территорий и плотности застройки, влияющих на процесс рассеивания загрязняющих веществ.

Практически постоянный высокий уровень загрязнения воздуха вне зависимости от погодных условий наблюдается вблизи крупных автотранспортных магистралей. Однако загрязнение

прилегающих к автотрассам территорий носит локальный характер и практически всегда ограничивается первой линией застройки. На территориях, не подверженных влиянию автотрасс (большинство жилых микрорайонов), даже в периоды, когда метеоусловия способствуют увеличению загрязнения, концентрация загрязняющих веществ увеличивается незначительно.

На сегодняшний день для Москвы проблему представляют оксиды азота, являющиеся продуктами горения любого вида топлива. Повторяемость повышенных значений оксидов азота составляет 70–90% на территориях, подверженных воздействию выбросов автотранспорта, и 30% на удаленных от автотрасс городских территориях. Среднегодовая концентрация оксидов азота превышает допустимую норму в 1,2–1,4 раза. Динамика среднегодовых значений концентраций оксидов азота не позволяет говорить об уменьшении содержания их в атмосфере Москвы.

Динамика среднегодовых значений концентраций оксида углерода демонстрирует устойчивую благоприятную ситуацию: нет оснований говорить о положительном тренде. Среднегодовые концентрации уменьшаются на всей территории города. Даже вблизи автотрасс концентрации оксида углерода не превышают установленных норм. Исключением является 2002 год, когда в августе и сентябре в условиях задымления концентрации оксида углерода заметно возросли, что повлекло за собой и рост среднегодовых концентраций на всей территории города. Среднегодовые концентрации оксида углерода и диоксида азота на ряде автоматических станций контроля загрязнения атмосферы за последние 7 лет представлены на рис. 19.6 и 19.7.

Комплексный показатель уровня загрязнения атмосферы ИЗА₅, полученный для города в целом и рассчитанный по 5 приоритетным загрязняющим веществам (формальдегид, озон, оксид азота, диоксид азота и оксид углерода) позволяет характеризовать загрязнение атмосферного воздуха в Москве как высокое. Представленные результаты (рис. 19.8) наглядно демонстрируют преобладание высокого и повышенного загрязнения атмосферы на территории Москвы.

Сравнительный анализ среднегодовых концентраций загрязняющих веществ в г. Москве и других крупных мегаполисах показывает, что по основным веществам (за исключением оксида углерода) качество воздуха в Москве сопоставимо с качеством воздуха других известных мегаполисов. В табл. 19.2 представлены среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, в табл. 19.3 — предельно допустимые концентрации для России и стран ЕС.

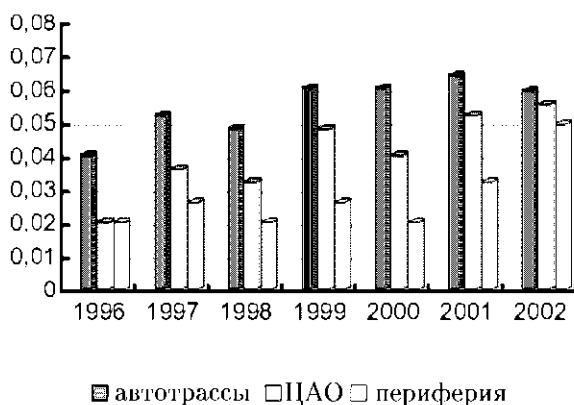


Рис. 19.6. Среднегодовые концентрации диоксида азота в мг/м³

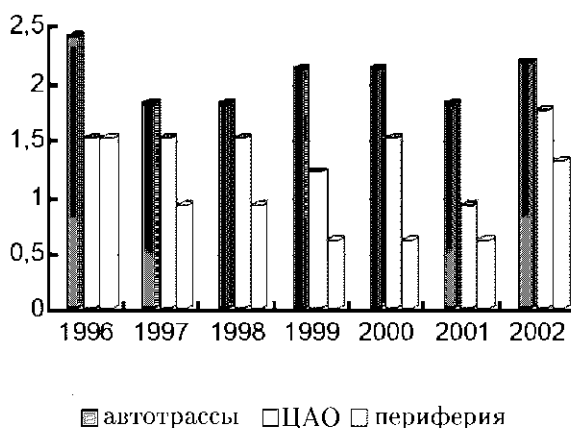


Рис. 19.7. Среднегодовые концентрации оксида углерода в мг/м³

Проблема озонового слоя

Озоновые дыры, озоновый кризис — эти словосочетания у всех на слуху. Благодаря средствам массовой информации опасность угрозы человечеству из-за разрушения озонового слоя доведена практически до жителей всех развитых стран мира. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования показали, что непосредственной причиной образования озоновой дыры над Антарктикой и уменьшения озона в Северном полушарии являются антропогенные воздействия, связанные с

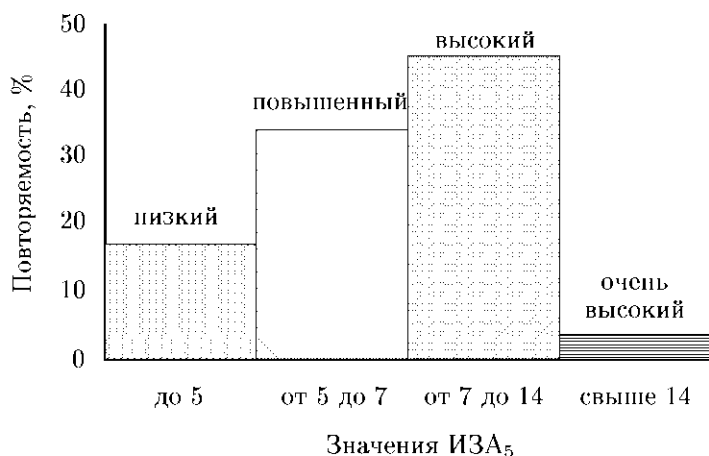


Рис. 19.8. Комплексный показатель загрязнения атмосферы ИЗА₅ для Москвы в 2002 г.

Таблица 19.2. Среднегодовые концентрации в крупных мегаполисах

Загрязняющее вещество	Среднегодовая концентрация, мкг/м ³					
	Москва	Берлин	Париж	Гонконг	Прага	Стокгольм
оксид углерода	1700	700	1450	1055	2300	850
диоксид азота	40	52	42	60	36	38
оксид азота	80		51	78	20	
диоксид серы	7	6	9	18	8	3
озон	60	84	46	36	36	55

увеличением промышленного производства фреонов и других озоноразрушающих веществ [176]. Меры, принятые и планируемые для выполнения на государственном уровне соглашений по ограничению производства озоноразрушающих веществ, трактуются как пример разумной реакции человечества на последствия антропогенных воздействий на биосферу, как пример, показывающий способность человечества, перешагнувшего один из пределов своего развития, вовремя одуматься и принять правильные меры. Однако наряду с этой, наиболее широко распространенной

Таблица 19.3. Предельно допустимые концентрации для России и стран ЕС

Вещество	Время воздействия	Россия	ЕС
		ПДК, мкг/м ³	ПДК, мкг/м ³
диоксид азота	30 мин	85	—
	60 мин	—	200
	24 ч	40	—
	год	—	40
Диоксид серы	10 мин	—	500
	30 мин	500	—
	60 мин	—	350
	24 ч	50	125
	год	—	50
озон	30 мин	160	—
	60 мин	—	180
	8 ч	—	120
	24 ч	30	—
оксид углерода	15 мин	—	100 000
	30 мин	5 000	60 000
	60 мин	—	30 000
	8 ч	—	10 000
	24 ч	3 000	—
взвешенные вещества	30 мин	500	—
	60 мин	—	—
	24 ч	150	—
PM ₁₀	24 ч	—	50
	год	—	40
формальдегид	30 мин	35	100
	24 ч	3	—
бензол	30 мин	300	—
	24 ч	100	5

точкой зрения, существуют и другие трактовки наблюдаемых явлений. В частности, в последние годы появились доказательства большой роли естественных долгопериодных изменений динамики атмосферы в истощении озонового слоя [53, 50], особенно в связи с неожиданно сильным уменьшением озоновой дыры в Антарктике в сентябре 2002 г. [173].

Кратко рассмотрим историю озонового кризиса и его интерпретации [15, 65, 82]. Озон — газ, являющийся очень хорошим окислителем, поэтому его сравнительно мало в нижних слоях

тропосферы. Слой атмосферы на высотах 10–40 км иногда называют озоновым только потому, что в пределах этого слоя наблюдается относительно большая концентрация озона. В пределах озонового слоя только одна молекула из 100 000 является молекулой озона. Общее содержание озона в атмосфере ничтожно — $4 \cdot 10^{-7}\%$ от массы атмосферы. Вместе с тем, влияние озона на радиационные, термодинамические, циркуляционные явления в атмосфере и различные процессы в биосфере велика. Озон, поглощая ультрафиолетовое излучение с длиной волны около 0,3 мкм (излучение УФ-Б, УФ-С), выполняет роль экрана биосферы от губительного излучения. Озон является также и парниковым газом, поскольку он поглощает инфракрасное излучение.

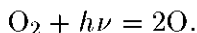
Общее содержание озона в атмосфере определяется как количество озона, находящегося в вертикальном столбе с основанием 1 см^2 . Типичное значение общего содержания озона, выражаемого в специальных единицах шкалы высот, составляет около 300 единиц Добсона. Одна единица Добсона соответствует толщине слоя озона в 10^{-3} см при нормальном давлении и температуре, что примерно соответствует средней концентрации озона в атмосфере, равной одной частице на миллиард.

Химия атмосферного озона довольно сложна, так как существуют сотни химических и фотохимических реакций, приводящих к образованию и разрушению озона. Интенсивность этих процессов зависит от температуры, давления, состава атмосферы, освещенности, поэтому концентрация озона характеризуется временной изменчивостью различных периодов (суточная, сезонная периодичность).

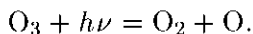
Основную роль в возникновении озона играет реакция образования озона из атомарного и молекулярного кислорода:



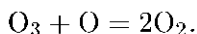
М обозначает любую частицу, необходимую для отвода энергии от молекулы озона. Атомарный кислород, необходимый для образования озона, образуется при фотохимической диссоциации молекул кислорода:



Под воздействием солнечного излучения происходит также и разложение озона:

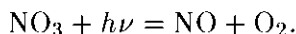
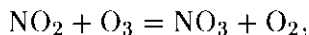
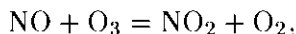
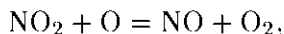


При сравнительно больших концентрациях газов может происходить реакция разрушения озона:



Образование и разрушение озона в этом кислородном цикле, приводит к явлению, называемому «озонным дождем»: появляется постоянный поток озона вниз (из стратосферы в тропосферу), стратосферно-тропосферный обмен. Интенсивность реакций, определяющих условия образования и разрушения озона, изменяется с высотой, поэтому существует высота, на которой концентрация озона будет максимальной (около 25 км). Высота максимальной концентрации зависит от географической широты и времени.

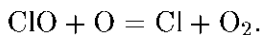
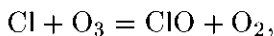
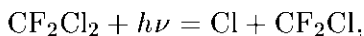
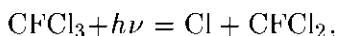
Наряду с кислородным циклом образования озона существуют и другие (азотный, водородный, углекислотный и т. д.), из которых азотный цикл, играет не менее важную роль в формировании и вариациях слоя озона. В азотном цикле могут участвовать как природный азот, так и его соединения, образующиеся в результате антропогенной деятельности, например продукты работы самолетных двигателей. Основные источники антропогенного поступления окислов азота в атмосферу — сжигание ископаемого топлива, использование азотных удобрений. Приведем основные реакции азотного цикла, разрушающие слой озона:



Одна из причин изменчивости озонового слоя — воздействие озоноразрушающих веществ (ОРВ). К ОРВ относятся вещества, содержащие хлор и/или бром: хлорфторуглероды, бромфторуглероды, четыреххлористый углерод, метилбромид, гидрохлорфторуглероды. Степень воздействия этих веществ на озоновый слой характеризуется озоноразрушающим потенциалом. В России в 1996 г. 46% ОРВ использовалось в производстве аэрозолей, 27% — в холодильной технике, 14% — в производстве растворителей, 11% — пенопластов, 2% — в производстве пены для огнетушителей.

Среди веществ, оказывающих влияние на озон, особую роль играют хлорфторуглероды (ХФУ) — вещества широко используемые в промышленности и быту в качестве пенообразующих материалов, хладагентов, аэрозолей, растворителей. Относительная дешевизна, нетоксичность, стойкость и широкий спектр полезных свойств обусловили их широкое распространение. Объем мирового производства ХФУ с 1950 по 1975 г. ежегодно возрастал на 7–10%. В 80-х гг. производилось около 1 млн т ХФУ. Для производства и потребления ХФУ характерна высокая географическая неравномерность. Например, в конце 80-х гг. на среднего жителя Европы или Северной Америки производилось и потреблялось 0,85 кг ХФУ в год, а на среднего жителя КНР или Индии — только 0,03 кг.

Научные исследования в середине 70-х гг. показали, что ХФУ, поднимаясь в верхние слои атмосферы, разрушаются под действием ультрафиолетового излучения с выделением хлора, который вступает в реакции с поглощением озона:



Таким образом реализуется цикл реакций, приводящий к многократному действию одного атома хлора на озон. Находясь в стратосфере один атом хлора может уничтожить до 1000 молекул озона, прежде чем исчезнет из стратосферы. Исчезнуть хлор может в виде соляной кислоты HCl . Схема разрушения озона под действием ХФУ приведена на рис. 19.9. Коварность процесса действия хлора на атмосферный озон обусловлена следующим. Во-первых, многократностью химической регенерации хлора. Во-вторых, длительностью периода запаздывания между моментом синтеза молекулы ХФУ и моментом ее появления в стратосфере. Этот период равен 15 и более лет.

Ослабление озонового слоя может привести, прежде всего, к усилению ультрафиолетового излучения в диапазоне около 290–320 нм (так называемый УФ-В). Полагают, что ультрафиолетовое излучение этого диапазона оказывает влияние на молекулы ДНК, передающие генетический код. Усиление интенсивности ультрафиолетового излучения приводит к росту вероятности возникновения раковых заболеваний кожи, снижает урожайность

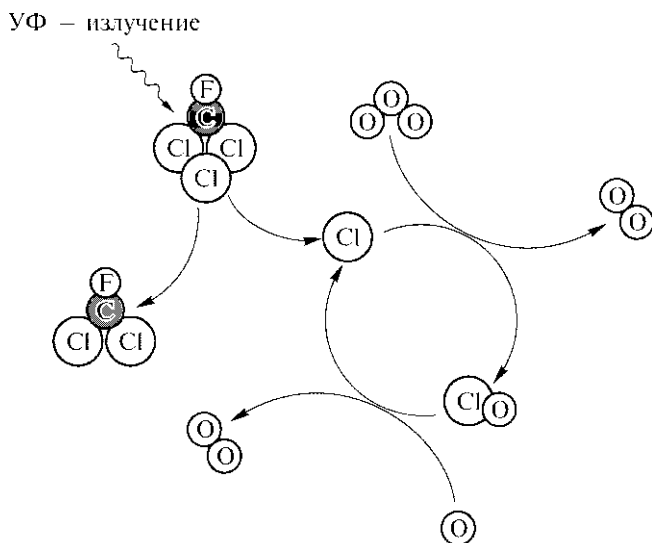


Рис. 19.9. Схема разрушения озонового слоя хлорфторуглеводородами [82]

некоторых видов сельскохозяйственных растений, оказывает губительное воздействие на одноклеточные и микроорганизмы в поверхностном слое Мирового океана. Последнее может нарушить пищевые цепи в океане.

В 1985 г. были опубликованы экспериментальные данные об аномально низком содержании озона, полученные на двух антарктических станциях Великобритании — «Фарадей» и «Хали Бей». Автор статьи Фарман предположил, что причина аномального истощения озонового слоя (на 40%) заключается в воздействии на озон ХФУ. Результаты были опубликованы в престижном научном журнале «Nature» и вызвали живой интерес. Анализ измерений озона, которые проводились спутником «Nimbus» с 1978 г., подтвердили наличие озоновой дыры. Интересно, что компьютер, обрабатывавший данные по озону, исключал аномально низкие значения концентрации озона как ошибочные. Именно поэтому озоновая дыра не была обнаружена по спутниковым данным. После дополнительного анализа первичные данные были восстановлены.

На рис. 19.10 показаны изменения общего содержания озона на 75° широты Южного полушария, средние для сентября 1979–2002 гг. по измерениям спутника «TOMS». В

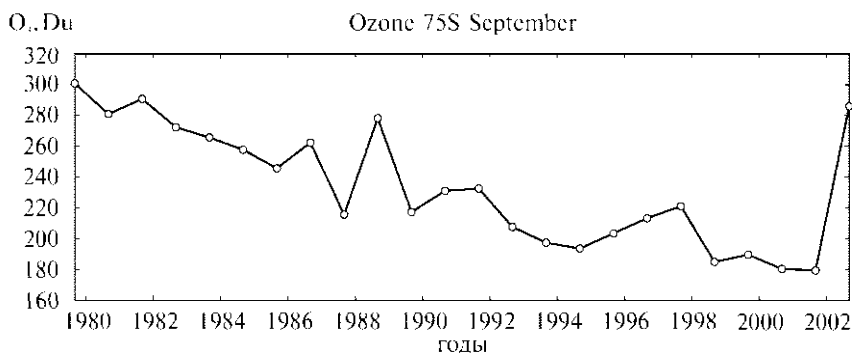


Рис. 19.10. Изменения общего содержания озона на 75° широты Южного полушария, средние для сентября 1979–2002 гг. по измерениям спутника «TOMS»

течение 1979–2002 гг. (за исключением 1988 г.) происходило непрерывное уменьшение озона над Антарктикой, и озоновая дыра распространилась на огромную площадь более чем на весь антарктический континент. Объяснение появления и эволюции озоновой дыры состояло в следующем: стратосферный вихрь над Антарктикой в 1979–2001 гг. был сильно изолирован от взаимодействия со средними южными широтами, поэтому в нижней стратосфере наблюдались очень низкие температуры (ниже -85 градусов). При таких низких температурах образуются полярные стратосферные облака (ПСО), состоящие из мельчайших кристалликов льда и кислотных соединений. На поверхности ПСО происходят гетерогенные химические реакции (в твердой фазе), которые во время полярной антарктической ночи (июнь–август) приводят к увеличению окиси хлора (ClO) и молекул хлора. С восходом Солнца над Антарктикой происходит диссоциация молекул хлора, образуется атомарный хлор, который быстро разрушает озоновый слой [176].

В 1987 г. был проведен специальный научный эксперимент: полет на высотном самолете из Южной Америки к Южному полюсу. В полете проводились измерения концентраций озона и ClO . Материалы измерений подтвердили сильную связь концентраций озона и ClO . В районе озоновой дыры наблюдалось резкое уменьшение концентрации озона и рост концентрации ClO почти в 500 раз. Рис. 19.11 приводит результаты этого эксперимента. Для подобных экспериментов в Арктике в РФ используется специальный высотный самолет-разведчик М-55, способный

летать в стратосфере. Результаты самолетных и других наблюдений полностью подтвердили следствия химического механизма разрушения озонового слоя.

Параллельно с получением научных данных о влиянии ХФУ на озоновый слой в политической и экономической сферах, прежде всего США и Западной Европы, проводились мероприятия, направленные на ограничение распространения и использования ХФУ. В 1978 г. в США был

принят закон, запрещающий использование ХФУ в качестве аэрозольных распылителей. В 1985 г. была подписана Венская конвенция, в которой предусматривался комплекс мероприятий по сохранению озонового слоя. В 1987 г. в Монреале был подписан Протокол о веществах, разрушающих озоновый слой, в котором намечены сроки и темпы замораживания и сокращения мирового производства наиболее распространенных ХФУ. Монреальский протокол был подписан 16 сентября, с тех пор этот день отмечается как Всемирный день защиты озонового слоя. В 1990 г. в Лондоне под эгидой ЮНЕП прошло совещание, в котором приняли участие представители 92 стран. На этом совещании был расширен список запрещенных к производству веществ и принято решение о полном прекращении производства ХФУ к 2000 году. На четвертой встрече в Копенгагене в 1992 г. было принято новое дополнение к Монреальскому протоколу, сроки реализации проекта были сокращены. Россия, правопреемница СССР, объявила о невозможности выполнения новых требований Протокола в полном объеме.

Согласно некоторым оценкам, например [65], полный отказ от производства ОРВ и переход на использование веществ, не представляющие угрозы для озонового слоя, в России потребует до 5 млрд долларов в год, если учесть демонтаж оборудования для производства запрещенных ОРВ, то эти расходы возрастут, по крайней мере, в 3 раза.

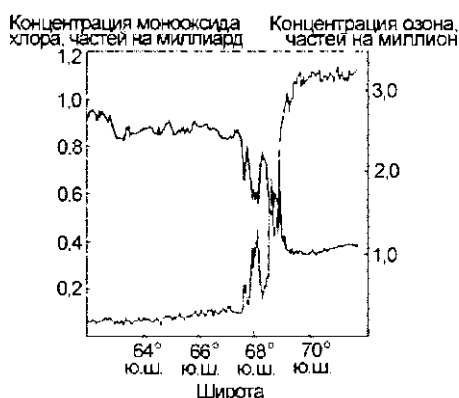


Рис. 19.11. Связь концентрации хлора и концентрации озона на основе самолетных измерений во время полетов от 53° ю. ш. до 72° ю. ш. [82]

Тем не менее, к настоящему времени в научной, политической и экономической сферах преобладает точка зрения, согласно которой антарктическая озоновая дыра, региональные озонные дыры Северного полушария и тренды озона есть результат, главным образом, антропогенного воздействия, прежде всего ХФУ на озоновый слой Земли. Общая схема связи режима озона в атмосфере с антропогенными выбросами в настоящее время представляется следующим образом [171]. Снижение уровня ХФУ, как предполагается международными соглашениями, должно вести к восстановлению озона в стратосфере. В то же время рост парниковых газов и выбросы озоноактивных веществ в атмосфере (при этом следует иметь в виду, что практически все парниковые газы «озоноактивны», т. е. активно участвуют в сложных циклах реакций различных «семейств газов», управляющих режимом озона) ведет к потеплению вблизи поверхности Земли и охлаждению стратосферы. Такое перераспределение температуры изменяет устойчивость атмосферы, изменяет условия волнового переноса, способствует тропосферно-стратосферному обмену. Это, в свою очередь ведет к выносу в стратосферу озоноактивных компонент из тропосферы. Как нагревание стратосферы, так и занос озоноразрушающих примесей в стратосферу потенциально замедляет ожидаемое восстановление озонового слоя из-за снижения уровня ХФУ.

Особо следует остановиться на режиме озона в Арктике. Известно, что отличие мощной озоновой дыры над Антарктидой от слабовыраженных подобных локальных дыр над Арктикой объясняется прежде всего существенно более низкой температурой стратосферы над Антарктидой, способствующей появлению там на высотах 12–30 км так называемых «полярных стратосферных облаков». Эти облака двояким образом способствуют стоку озона. Во-первых, нейтральные к озону соединения хлора превращаются на поверхности частиц облака в активный хлор, разрушающий молекулы озона. Во-вторых, на поверхность частиц ПСО стекает часть молекул окиси азота, конкурирующих с озоном в реакциях с активным хлором, способствуя тем самым общему стоку озона.

Наблюдаемое похолодание стратосферы Арктики и повышение влажности в ней может способствовать увеличению площади и объема Арктических ПСО. Сравнительные оценки режимов озонового слоя и ПСО над Арктикой и Антарктикой по данным UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) позволили сделать вывод, что при похолодании стратосферы Арктики на 3–4 °C

условия над Арктикой приблизятся к условиям над Антарктикой. Это может привести к драматическим последствиям для Северного полушария, где в высоких широтах обитает гораздо больше людей, чем в высоких широтах Южного полушария.

В этой сложной иерархии причинно-следственных связей (неизбежно включающих через термодинамику и вопросы общей циркуляции) из-за наличия зависящих от условий и времени обратных связей может меняться как величина, так и направление возможных изменений в режиме озона.

Рассмотрим теперь доводы некоторых исследователей, которые считают, что антарктическая озоновая дыра возникает в основном в результате процессов изменения атмосферной циркуляции, периодического роста солнечной активности и космического излучения. Некоторые представители этой точки зрения считают [65], что исключительно антропогенный характер происхождения антарктической озоновой дыры не доказан, и пока это только научная гипотеза. Однако на основе этой научной гипотезы на межправительственном уровне был принят ряд соглашений, регламентирующих производство веществ, обладающих способностью воздействовать на озон.

В пользу природного происхождения озоновых аномалий высказывались следующие соображения:

- 1) наблюдаемые изменения озонового слоя часто хорошо согласованы с вариацией метеорологических параметров климатообразующих центров, например, влияние Азорского антициклона на режим озона над Россией;
- 2) сильная незональность озоновых аномалий;
- 3) вертикальное распределение дефицита озона согласуется с атмосферно-динамическим механизмом формирования озоновых аномалий.

Механизм возникновения озоновых аномалий возможно связан с естественными изменениями динамики атмосферы и климата — эта точка зрения поддерживается многими исследователями. Однако, в конечном итоге, и многие динамические процессы в атмосфере вызываются также антропогенными причинами, например, ростом концентрации парниковых газов.

Научные исследования в НПО «Тайфун» в г. Обнинске, в ходе которых были проанализированы данные о приливном ветре в верхней атмосфере на высотах 85–100 км в период с 1953 г. до наших дней, показали связь аномального изменения скоростей

приливного ветра с образованием озоновой дыры. Эти исследования позволили сделать вывод о том, что антарктическая озоновая дыра существовала и раньше (по крайней мере, с 1953 г.), до ее обнаружения прямыми инструментальными методами в 1984 г.

Озоновые дыры образуются не только над Антарктидой, в зимнее время они постоянно существуют над большей частью Европы, над Восточной Сибирью. Продолжительные экспериментальные исследования содержания озона над Европой показали, что среднеквадратичное отклонение общего содержания озона достигало 10–12% еще в 1957–1979 гг. Согласно исследованиям ряда специалистов по озону Центральной аэрологической обсерватории важнейший вклад в формирование долговременных изменений общего содержания озона в Северном полушарии вносят естественные геофизические процессы. Аномально низкие значения общего содержания озона в 1992–1993 гг. были вызваны мощным извержением вулкана Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. Последние исследования показывают, что извержения вулканов сопровождаются значительным выбросом фторсодержащих веществ. Ранее считалось, что подобные вещества могут быть только антропогенного происхождения. Геологи указывают на еще один возможный природный механизм действия на озоновый слой. В ядре Земли растворено значительное количество водорода, который поступает в атмосферу. В атмосфере водород, взаимодействуя с озоном, разрушает его. Через рифтовые разломы в атмосферу наряду с водородом поступает метан, также приводящий к разрушению озонового слоя.

Модельные предсказания будущего поведения озонового слоя [176], в том числе озоновой дыры в Антарктике, на которых в значительной степени был основан Монреальский Протокол и другие международные соглашения, не учитывали долгопериодных изменений циркуляции и волновой активности атмосферы. В свою очередь, межгодовые и долгопериодные вариации динамики атмосферы связаны с изменениями в Мировом океане аномалиями температуры поверхности океанов (ТПО), которые являются термическим источником возбуждения планетарных атмосферных волн, оказывающих сильное влияние на циркуляцию стратосферы в зимне-весенний период, особенно во время стратосферных потеплений [144]. Поскольку антропогенные озоноразрушающие вещества имеют большое время жизни в атмосфере (годы и десятки лет), модели предсказали, что восстановление озонового слоя к нормальному состоянию под действием сокращения эмиссии в атмосферу фреонов и галонов должно произойти лишь к 2030–2050 гг. [176].

Действительность опровергла эти модельные прогнозы. Как видно из рис. 19.10, в сентябре 2002 г. произошло беспрецедентное увеличение озона над Антарктикой, что не может быть объяснено уменьшением влияния антропогенных факторов. В конце сентября 2002 г. в стратосфере Антарктики произошло сильнейшее стратосферное потепление, в результате которого стратосферный антарктический вихрь разрушился, наблюдался сильный вихревой перенос озона из средних южных широт, и озоновая дыра была намного меньше, чем в предыдущие годы. Такого сильного потепления не было за весь период наблюдений, начиная с 1960-х гг., за исключением менее сильного потепления 1988 г. Резкое уменьшение интенсивности полярного «барьера» в 1988 г. привело к увеличению озона над Антарктикой, что также наблюдалось еще в большей степени в сентябре–октябре 2002 г. Степень изолированности стратосферного вихря Антарктики меняется со временем. Сильные связи изменений стратосферной циркуляции вне полярного вихря и озоновой дыры (коэффициент корреляции $-0,9$ [52]) свидетельствуют о большой роли естественных долгопериодных вариаций динамики атмосферы в эволюции озоновой дыры над Антарктикой.

Физический механизм долгопериодных изменений циркуляции атмосферы в Северном полушарии может быть связан с влиянием аномалий ТПО северного Тихого океана и Атлантики на волновую активность и динамику атмосферы. Интерференция постоянного орографического источника (Скалистые горы) и изменяющегося во времени термического источника планетарных волн, зависящего от дипольных аномалий ТПО, может приводить к сильным изменениям волновой активности стратосферы Арктики. В Южном полушарии дипольные изменения ТПО южных океанов также приводят к интерференции термического возбуждения планетарных волн с орографическим источником (Анды), воздействуя на эволюцию озоновой дыры в Антарктике [50, 51]. Этот простой механизм аналогичен интерференции двух источников света в оптике.

Другими доказательствами большого влияния естественных изменений климата на стратосферу и озоновый слой являются сильные связи долгопериодных вариаций тропосферных параметров (давления на уровне моря, приземной температуры, осадков) — арктического и антарктического колебаний [177] — с изменениями стратосферной циркуляции и озона. Томпсон и Уоллес показали, что в конце 1960-х гг. произошли необычные изменения климата в глобальном масштабе, которые нашли свое отражение в уменьшении озонового слоя [178]. Являются ли эти

изменения климата следствием антропогенной деятельности или наряду с антропогенными факторами влияют естественные долгопериодные изменения Мирового океана — до сих пор неясно из-за многих неопределенностей в понимании физических процессов взаимодействия в системе океан — атмосфера — озоновый слой. Однако история озоновой дыры в Антарктике показывает, что исключительная роль антропогенных факторов в истощении озонового слоя ранее была сильно преувеличена.

Необходимо добавить несколько слов по поводу действия ультрафиолетового излучения на биоту. Суммарная ультрафиолетовая радиация у земной поверхности определяется не только эффективностью озонового слоя, но сильно зависит и от других факторов, прежде всего от состояния атмосферы, ее состава и примесей. Поэтому уменьшение общего содержания озона не обязательно будет приводить к росту ультрафиолетового излучения. Согласно [65], в настоящее время нет убедительных свидетельств положительных трендов УФ-Б и УФ-С радиации в период заметного уменьшения общего содержания озона. Необходимо подчеркнуть, что озоновый дефицит наблюдается, как правило, весной или зимой, когда вследствие низкого положения Солнца нельзя ожидать высоких значений ультрафиолетовой радиации.

В природных условиях повышенную дозу ультрафиолетового излучения растения получают в горах. В СССР были специальные высокогорные биологические станции (например, Памирская, расположенная на высоте 3860 м над уровнем моря), на которых проводились исследования по воздействию на растения повышенных доз УФ излучения. Наблюдения показали, что в условиях высокогорья происходит усиленное цветение, плодообразование, повышение жизненного тонуса. Напомним, что Н. И. Вавилов считал, что земледелие зародилось именно в горных областях «бадахшанского типа». Лабораторные и натурные эксперименты показывают, что растения, живые организмы обладают защитными механизмами, которые, вероятно, были выработаны в процессе эволюции на ранних стадиях развития биосферы. К результатам исследований на сельскохозяйственных растениях следует относиться особенно осторожно, так как они подвергаются комплексному воздействию: потепление, воздействие удобрений и загрязнений. Исследования воздействия повышенных доз радиации на сельскохозяйственные культуры носят противоречивый характер: наблюдается как рост урожайности, так и ее уменьшение.

Результаты исследований воздействия ультрафиолетового излучения на здоровье человека носят предварительный характер.

Исследования показывают, что наряду с отрицательными последствиями может иметь место и положительный эффект от увеличения ультрафиолетового излучения. Например, на Земле от размягчения костей страдают в настоящее время десятки миллионов человек (в основном пожилого возраста), усиление ультрафиолетового излучения облегчает явления, связанные с этим заболеванием, уменьшается количество переломов костей. По оценкам голландских медиков человеческий организм гораздо лучше адаптируется к увеличенному интенсивности ультрафиолетового излучения, чем к его ослаблению.

В пашумевшей книге американских авторов Р. А. Мадуро и Р. Шауэрхаммера «Дыры в озоновой угрозе, или научное свидетельство того, что небо не падает» [74] приводится история того, как компанией Du Pont Co была организована антифреоновая пропаганда. Запрет на вещества, содержащие ХФУ, принес компании несколько миллиардов долларов.

Таким образом, согласно представлениям геофизиков, изучающих озон уже в течение длительного времени, пока нет полного понимания геофизических процессов, определяющих состояние стратосферного озона. Наряду с влиянием озоноактивных и парниковых газов, нельзя отрицать того, что существенный вклад в изменчивость озонового слоя вносят иные естественные геофизические процессы. Научные представления о влиянии ультрафиолетового излучения Солнца на растения, организм человека еще очень несовершенны. Пока не разработаны вещества, способные полностью заменить фреоны, галоны, растворители, содержащие ОРВ. Разработка таких веществ, анализы токсикологических свойств, которые необходимо сделать перед внедрением их в производство, потребует нескольких десятков лет. Все это ставит под сомнение научную обоснованность и сроки реализации соглашений (Монреаль, Лондон, Копенгаген), регламентирующих производство и использования ОРВ.

Подводя итоги, мы видим, что имеются альтернативные подходы к осмыслению проблемы сохранения озонового слоя Земли. Тем не менее, Монреальский Протокол 1987 г. и последующее Копенгагенское Дополнение 1992 г. явились первым, и пока единственным примером совместного действия всего человечества в отношении своей среды обитания. Выполнение этих соглашений уже остановило рост озоноразрушающих примесей в атмосфере Земли. После отмеченного в 1994 г. пика содержания озоноразрушающих примесей (ХФУ и др.) в атмосфере отмечается устойчивое уменьшение некоторых, сравнительно короткоживущих примесей, таких как метилхлороформ. В то же время концентрация

галогенов уменьшается существенно медленнее из-за большого времени жизни ХФУ (более 100 лет).

Однако в настоящее время можно говорить только о некоторых первых признаках восстановления озона в отдельных регионах, например в поясе 25° – 30° с.ш. [176]. Только будущее покажет, произойдет ли ожидаемое восстановление озонового слоя вслед за уменьшением содержания ХФУ. Возможен, увы, и противоположный вариант, при котором из-за продолжающегося роста парниковых газов в атмосфере температура стратосферы будет понижаться, и даже при меньшем уровне ХФУ процесс редукции озона будет продолжаться. Этот вариант возможен и при возрастании уровня бромидов в стратосфере. Все эти варианты увязаны тесными обратными связями с уже отмеченными изменениями в общей циркуляции атмосферы, роль которой в режиме атмосферного озона безусловно велика.

В последние десятилетия человечество сталкивается с проблемами необратимых природных изменений практически повсеместно. Их последствия из-за множества слабоизученных и труднопрогнозируемых связей имеют широкие рамки неопределенности. В пределах этих рамок возможны различные решения, выгодные только некоторым странам или международным корпорациям. Попытки строить на недостаточно достоверных прогнозах конкретные рекомендации по проведению международной экологической политики могут привести к тяжелым последствиям. Отсюда становится ясной жизненная необходимость создания собственных национальных комплексных систем мониторинга атмосферы, отвечающих международным стандартам. Затраты на создание таких систем многократно окупятся уже в ближайшем будущем. Отсутствие собственных систем мониторинга ставит в зависимость от зарубежных нередко конъюнктурных научных оценок, что приводит к навязыванию невыгодных мер и технологий.

Загрязнение океана

Экономическая и хозяйственная деятельность приводит к растущему поступлению загрязнений в Мировой океан. Так как океан и моря занимают три четверти земной поверхности, это превращает их в естественные приемники загрязнений вследствие глобальной циркуляции океана и атмосферы. Моря активно использовались и продолжают использоваться для захоронения различного рода отходов. В шельфовых морях влияние

загрязнений проявляется сильнее, чем в открытых частях океана. Особенно подвержены загрязнению внутренние мелководные моря, подобные Азовскому и Каспийскому.

Комплексный характер процессов, определяющих загрязнение океана, делает очень сложным проведение анализа экологического состояния морей, разработку эффективных методов борьбы с загрязнением. К концу XX в. сформировалось устойчивое представление о глобальном химическом загрязнении Мирового океана. Загрязняющие вещества образуют области повышенной загрязненности в шельфовой зоне океана, в зонах фронтов, в эвфотическом слое, на границах разделов, т. е. там, где протекают активные биологические процессы и сосредоточена основная масса живых организмов. Наибольшую опасность из множества веществ, поступающих в Мировой океан, представляют хлорированные углеводороды, радионуклиды, тяжелые металлы. Поступлений многих видов загрязнений уменьшает, прежде всего, первичную продукцию фитопланктона. Следует отметить, что многочисленные пессимистические прогнозы уровня загрязнения Мирового океана, сделанные в конце XX в., оказались ошибочными вследствие недооценки ассимиляционного потенциала Мирового океана и примитивности прогностических моделей, использованных для прогноза, и ненадежности данных об уровнях загрязнений, полученных в разное время.

Наибольшая часть загрязнений поступает в моря с суши (40–45%). Большую опасность для морских экосистем представляет не только поступление химических загрязнений, но и попадание с речным стоком большого количества биогенных веществ, что обуславливает эвтрофикацию морских вод. Вторым по значимости источником загрязнений, примерно равным доле поступления загрязнений с речным стоком, является атмосферный перенос. На третьем месте (примерно 20%) находятся местные источники загрязнения, включающие коммунальные стоки, дам্পинг (захоронение загрязнений), смыв промышленных отходов и т. п.

Изучение радиоактивности вод Мирового океана началось после Второй мировой войны. Стимулировали проведение этих исследований интенсивное развитие атомной энергетики, взрывы атомных и водородных бомб. В 1954–1955 гг. японские ученые в районе атолла Бикини проследили путь водных масс, загрязненных радиоактивностью вследствие испытания атомной бомбы в атмосфере. Продукты взрывов вместе с загрязненными ими океаническими водами за 4 месяца проделали путь в 2000 км, а за 8 месяцев — 7000 км. Если вспомнить, что окружность

Земли по экватору составляет около 40 000 км, то становится очевидным, что опасность грозит всем жителям планеты.

С развитием атомной промышленности встал вопрос и о захоронении радиоактивных отходов. В 50-х гг. XX столетия считалось, что идеальным могильником для таких отходов может служить Черное море. Тогда бытовало мнение, что глубинные слои Черного моря спокойны и возраст придонных вод ~ 1000 лет, т.е. обмен с поверхностными слоями почти отсутствует. Для выяснения этого вопроса интенсифицировались исследования динамики черноморских вод и было показано, что возраст глубинных водных масс Черного моря всего ~ 130 лет. В этих работах принимала участие и кафедра физики моря и вод суши физического факультета. Сотрудниками кафедры физики моря и вод суши были выполнены инструментальные измерения скоростей течения в придонном слое Черного моря, которые показали, что скорости у дна в некоторых районах достигают величины нескольких десятков см/с. Натурные измерения турбулентных характеристик вблизи дна позволили определить истинные значения коэффициентов обмена в придонном слое моря. В результате выполненных исследований проект захоронения радиоактивных отходов в Черном море в то время был закрыт. Однако проблема обезвреживания и захоронения радиоактивных отходов с годами становится все более и более актуальной и требует своего разрешения. В настоящее время захоронение радиоактивных отходов в море, как правило, происходит при международном контроле.

Изучение радиоактивности вод океана имеет не только чисто практическое значение. Это один из методов исследования процессов, происходящих в океанах. Изотопы, находящиеся в океане, делят на три группы:

- терригенные, обусловленные размытием и последующим сбросом реками в океаны материала, слагающего поверхность материков. С помощью таких изотопов проводят биохимические и геохимические исследования;
- космогенные, выпадающие из атмосферы вместе с осадками. Эти изотопы используются для изучения физических процессов, протекающих на границе раздела океан атмосфера;
- искусственные, которые попадают в воду при взрывах.

Основные задачи современной ядерной гидрофизики заключаются в выявлении источников изотопов в океане, исследовании полей радиоактивности на поверхности океана, изучении глубинного распределения изотопов, создании методов прогноза радиационной обстановки в океане, разработке методов исследования и способов измерения радиоактивного фона Мирового океана.

В настоящее время почти 20% площади Мирового океана покрыто органическими пленками. Сюда относятся вещества антропогенного и биогенного происхождения. Антропогенные загрязнения особенно велики в зонах экономических интересов человека — шельф, эстуарии рек, крупные судоходные трассы. Нефть и нефтепродукты составляют основу этого вида загрязнений.

При изложении этого раздела мы следуем [70, 83]. Кроме нефтепродуктов в прибрежных водах обнаруживаются синтетические поверхностно-активные вещества (ПАВ). В промышленности и быту применяется большое количество детергентов, используемых как моющие средства, стабилизаторов пен и эмульсий, замедлителей испарения и т. д. Попадая со сточными водами в океан, они также участвуют в образовании поверхностно-активных пленок. Эти вещества разнообразны по составу и к ним относятся алкилсульфаты и сульфонаты, алкилбейзолсульфонаты (с длиной цепи 12–16 атомов углерода), полиэфиры оксиэтилированных спиртов и т. д. В основном все эти вещества хорошо растворимы в воде.

Еще одним источником поступления антропогенных загрязнений в океан является адсорбция из атмосферы, из так называемой эоловой взвеси — пылевых частиц, переносимых ветром. Для образцов, взятых в акватории Тихого океана, один кубометр воздуха содержит от 0,1 до 0,8 мкг органического вещества. Это производные карбоновых кислот с длиной цепи от 12 до 18 атомов углерода, причем четные основания преобладают над нечетными, а максимум приходится на $C_{16:0}$ углерода (пальмитиновая кислота). Также обнаружены ненасыщенные углеводородные цепи, но их содержание понижено по сравнению с насыщенными. Для них максимум содержания соответствует группе $C_{18:1}$ (олеиновая кислота).

Образование патурных ПАВ может происходить биогенным путем за счет жизнедеятельности зоопланктона, фитопланктона и других морских организмов и растений. Несмотря на то, что биопродуктивность максимальна в толще морских вод, происходит вынос взвешенных и растворенных биогенных ПАВ на поверхность пузырьками воздуха. Материал стенок пузырьков,

насыщенных адсорбированными ПАВ, переходит в поверхностные пленки.

Детальные химические анализы биогенных органических ПАВ до сих пор не проведены. Хотя давно известно, что физические свойства естественных пленок из различных проб сходны. Это видно из зависимостей поверхностного давления, что косвенно может служить подтверждением идентичности их состава. С другой стороны, физические свойства типичных проб естественных пленок отличаются от свойств составляющих их соединений. Это может происходить за счет того, что естественные пленки представляют собой сложную смесь широкого набора ПАВ. Кроме того, естественные пленки часто представляют собой слой порядка нескольких десятков размеров молекул.

Из результатов анализа проб естественных пленок ПАВ известно, что их составляют сложные комплексы из основных классов органических соединений: липиды, протеины, углеводы и др. (например, стиролы, гуминовые вещества). Между классами обнаружено примерное распределение: протеины ~50%, углеводы ~30%, липиды ~12%. Разбиение по процентному составу носит условный характер, поскольку в естественной пленке органические вещества находятся не в чистом виде, а в виде сложных комплексов. Отмечается, что даже малая добавка липидов может оказывать существенное влияние на поверхностное давление в пленке. Сравнение естественных пленок с искусственно составленными из известных компонент показало, что наиболее стабильными компонентами являются жирные кислоты и их эфиры и в меньшей степени протеины, углеводы и углеводороды.

Преобладание в естественных пленках насыщенных карбоновых кислот говорит о том, что у поверхности раздела аккумулируются химически стабильные ПАВ. Несмотря на то что они содержатся в морских организмах в меньших количествах, чем ненасыщенные кислоты, их большая стойкость к микробиологическим и фотохимическим воздействиям приводит к наблюдаемому балансу. Заметим, что для биогенных пленок ПАВ в силу их происхождения характерны сезонные вариации состава.

Наряду с пленками особую опасность для водоемов представляют загрязнения, сконцентрированные в поверхностном микрослое воды, в котором сосредоточено огромное количество микроорганизмов. Концентрация загрязнений в микрослое более чем на порядок превышает концентрацию в нижележащих слоях, что может приводить к пагубным последствиям для экосистем

морей. Повышенное содержание нефтяных загрязнений наблюдается также на границе раздела вода–взвесь, находящейся в придонной части водоема.

Поверхностные загрязнения проявляются в форме сликов — участков выглаженной водной поверхности. Загрязнения уменьшают высокочастотные составляющие ветрового волнения, уменьшение высокочастотных компонент спектра поверхностных волн проявляется в выплаживании водной поверхности. Поверхностное натяжение в естественных пленках (в отсутствие видимого слика) понижено относительно чистой воды на 0,5–1,5 дин/см, а для видимого слика на 6–9 дин/см. В отдельных случаях больших загрязнений наблюдаются и меньшие значения коэффициента поверхностного натяжения. Так для акватории Нью-Йоркской бухты отмечено падение до 51 дин/см, а в отдельных районах Атлантики наблюдались значения коэффициента поверхностного натяжения 65 дин/см. Существенное понижение поверхностного натяжения обнаружено в прибрежных районах и в зонах интенсивного судоходства. Причем это понижение хорошо коррелирует с концентрацией синтетических ПАВ в поверхностном слое. Естественные пленки, в основном, существуют при поверхностных давлениях ниже критического. В натуральных условиях они способны сохраняться при ветре до 5–7 м/с. При больших скоростях ветра пленка разрушается и может восстанавливаться при прекращении действия диспергирующего фактора, в зависимости от вида воздействия и состава пленки, через 10 с–10 мин. Учитывая тот факт, что средняя скорость ветра в океане составляет 6–8 м/с, по-видимому, можно считать, что пленки ПАВ в морской среде находятся в рассеянном состоянии, исключая, естественно, районы антропогенных загрязнений, высокой биопродуктивности и близких к штилю условий. В этом состоянии их упругость недостаточна для оказания гасящего воздействия на волны и образование сликов. Тем не менее, возникновение плотно упакованных пленок и появление сликов возможно в местах конвергенции течений (например, за счет внутренних волн или циркуляции Лэнгмюра) и ветровых нагонов.

Нефть в океане

Наряду с ПАВ антропогенного происхождения, естественными ПАВ, представляющими собой продукты жизнедеятельности морских организмов, и детергентами, нефть является основным источником загрязнения поверхности океана. Добыча нефти, особенно на шельфе, ее морские перевозки непрерывно растут.

Растет и количество нефтепродуктов, попадающих в море. Общее количество нефти и нефтепродуктов, попадающих ежегодно в океан, оценивается разными исследователями от 6 до 12 млн т.

Сырая нефть и ее производные — исключительно сложная смесь многих химических соединений. Она содержит около 300 углеводородов, индивидуальные концентрации которых варьируются по объему от $10^{-4}\%$ до единиц процентов. Физические и химические свойства нефти существенно зависят от месторождения, и разные ее сорта отличаются по содержанию парафина, смол и серы. Сырые нефти значительно отличаются по плотности — от весьма легкой ($0,65\text{--}0,70\text{ г/см}^3$) до весьма тяжелой ($0,98\text{--}1,05\text{ г/см}^3$). Вязкость нефти зависит от ее химического и фракционного состава, особенно от смолистости, и также изменяется в широких пределах.

При годовом объеме загрязнения Мирового океана в 6–11 млн т источники загрязнения распределены следующим образом: морской транспорт (промывные воды, докование, утечки, погрузочно-разгрузочные работы и т. д.) — 35%; промышленные стоки — 13%; морская добыча нефти — 1,5%; речной сток — 32%; поступление из атмосферы — 10%; природные источники поступления нефти — около 10%. Обращает на себя внимание относительно небольшое количество нефти, поступающей в океан непосредственно вследствие ее морской добычи и из природных источников. Анализ космических снимков морской поверхности показывает, что области глобального нефтяного загрязнения совпадают с трассами морских перевозок и устьями крупнейших рек. К крупномасштабным зонам загрязнения относятся не только шельф, но и некоторые районы открытой части моря. Средняя загрязненность таких морей как Баренцево, Балтийское, Черное, Каспийское, Средиземное превышает ПДК в несколько раз.

Нефть как естественный продукт биоты участвует в биогеохимических циклах миграции веществ на протяжении миллионов лет. Объем поступления нефти из недр в океан составляет около 0,6 млн т в год, причем основную ее массу составляют углеводороды. В Мировом океане ежегодно путем фотосинтеза производится 12 млн т углеводородов. В процессе длительной эволюции сложились механизмы ассимиляции, самоочищения водоемов от углеводородов. Однако в последние годы наблюдается значительное превышение природных объемов поступления нефти в океан. Ассимиляционная емкость целого ряда районов

Мирового океана превышена. Другим важнейшим моментом является то, что изменилось качество нефтяного загрязнения. С судовыми льяльными водами, с нефтеперерабатывающих предприятий, в результате моечных операций на танкерах в водоемы попадает не нефть и нефтепродукты, а продукты их переработки — парафиновые, асфальтосмолистые компоненты, нефтеостатки. Свойства и состав этих загрязнений отличаются от свойств и состава нефтей. В нефтеостатках концентрируются высокомолекулярные компоненты нефти, продукты полимеризации и поликонденсации углеводородов, продукты коррозии металлов и др. Основная масса нефтяных загрязнений поступает в океан именно в форме нефтесодержащих вод. По некоторым оценкам до 75% нефти поступает в океан в эмульгированном состоянии. Нефть, попавшая на поверхность океана в результате аварийного выброса, подвергается механическому и тепловому воздействию, поэтому вид нахождения нефти в море сильно изменяется со временем. Нефть в воде может находиться в виде пленок различной толщины, эмульсии, в растворенном виде и в форме сгустков. Теоретически нефть может растекаться до мономолекулярных слоев, однако в реальных условиях нефтяные пленки содержат тысячи молекулярных слоев. Размеры частиц нефти в эмульсии менее $3 \cdot 10^{-4}$ мм. Растворимость нефти зависит от многих факторов и лежит в пределах от 2 до 100 мг/л.

На чистой морской поверхности без ветра, волн и течений нефть растекается довольно быстро. Например, 1 м^3 средневосточной сырой нефти за 10 мин распространяется в пределах круга радиусом около 25 м. Через 1,5 часа радиус увеличивается вдвое, средняя толщина пленки при этом составляет 0,1 мкм. В целом судьба нефтяного слива в море характеризуется совокупностью следующих процессов: испарение, эмульгирование, растворимость, окисление, образование агрегатов, седиментация и биodeградация, включающая микробное разрушение и ассимиляцию планктонными и бентосными организмами.

Испарение летучих фракций в значительной степени зависит от природы нефти, температуры, ветровой и волновой деятельности и может составлять до 40% первоначального объема.

Низкомолекулярные углеводороды хорошо растворимы в морской воде. С увеличением молекулярного веса их растворимость уменьшается, что приводит к молекулярной дисперсии составных частей нефти в воде. При наличии кислорода и отсутствии ингибиторов углеводороды окисляются довольно быстро. Исследования показывают, что до 60% нефти может разлагаться под влиянием физико-химического окисления.

Большое влияние на скорость окислительных реакций оказывает температура воды. Так, при снижении температуры с 20 до 5 °С скорость реакций уменьшается в 2,5 раза, а при повышении температуры на 10 °С скорость окислительных реакций увеличивается в 2 раза. На фотохимическое окисление нефтепродуктов под действием солнечного света заметное влияние оказывают толщина пленки и состав морской воды. Продукты фотохимического и микробиологического окисления уменьшают коэффициент натяжения углеводородной пленки, скорость испарения воды через пленку (до 10 раз) и увеличивают скорость растекания пленки на поверхности воды.

Некоторые компоненты нефти (асфальты, полужидкие смолы, воск) могут продолжительное время оставаться на поверхности моря. Эти соединения легко эмульгируются, образуя устойчивые нефтеводные эмульсии повышенной вязкости с содержанием воды до 80%, известные под названием «шоколадного муса».

Даже после исчезновения нефти с водной поверхности ее вредное действие на экосистемы продолжает сохраняться длительное время. В 1969 г. каботажная баржа с нефтью села на мель вблизи Вудсхоллского океанографического института [107]. Ученые получили уникальную возможность для научного анализа последствий нефтяного воздействия на различные типы участков побережья. Хотя выброс нефти был непродолжительным, загрязненность нефтью на маршах (затопленные затопляемые участки) сохранялась в течение 10 лет. Участок, покрытый крупной галькой, сохранил нефтяное загрязнение в течение 2 лет. Скалистый участок не содержал загрязнений через 2 месяца.

Рассмотрим кратко динамику нефтяного slicka. Если разлившаяся нефть на поверхности моря не подвергается действию волн, ветра и течений, то основную роль в формировании области нефтяного разлива сначала играет сила тяжести. Затем начинают преобладать силы поверхностного натяжения, вязкости и инерции. В зависимости от соотношения сил, играющих главную роль в распространении нефти, выделяют три стадии в процессе формирования нефтяного загрязнения. На первой стадии (гравитационно-инерционный, или инерционный режимы растекания) определяющую роль играют силы тяжести и инерции. На второй стадии, называемой гравитационно-вязким режимом, определяющую роль играют силы тяжести и вязкости, на третьей — силы поверхностного натяжения и вязкости.

Радиальный размер области растекания нефти на первой стадии имеет вид

$$r = C_1 (g V r^2 \Delta)^{1/4},$$

где C_1 — константа, примерно равная 1, g — ускорение силы тяжести, V — объем нефтяной пленки, t — время, $\Delta = \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w}$, ρ_w и ρ_0 — плотность воды и нефти соответственно.

В гравитационно-вязком режиме растекания

$$r = C_2 g \frac{1}{6} V^{1/3} r^{1/4} \nu^{1/12} \Delta,$$

где ν — коэффициент кинематической вязкости воды, $C_2 = 1,5$.

Наконец, в режиме поверхностного натяжения имеем

$$r = C_3 \frac{\sigma^{1/2} t^{3/4}}{\rho^{1/2} \nu^{1/4}},$$

где $C_3 = 2,3$.

Величина σ является суммарной величиной поверхностного натяжения пленки на воде:

$$\sigma = \sigma_{wa} - \sigma_{w0} - \sigma_{a0},$$

где σ_{wa} , σ_{w0} , σ_{a0} — соответственно коэффициенты поверхностного натяжения на границах раздела вода–воздух, вода–нефть, воздух–нефть.

Приведенное разделение режимов растекания нефти является первым приближением к изучаемому процессу. Исследования показывают, что вязкость нефти влияет на коэффициент сопротивления между слоями нефти и воды и скорость растекания нефти в гравитационно-инерционном режиме.

Продолжительность режимов растекания зависит от первоначального объема нефти. Причиной прекращения растекания нефти является уменьшение и изменение знака коэффициента поверхностного натяжения пленки на воде. Однако определение этой границы является очень сложной задачей ввиду того, что в состав нефти входит много органических веществ, влияющих на величину коэффициента поверхностного натяжения.

Перемещение (дрейф) нефтяной пленки как целого в отличие от растекания определяется внешними силами: ветром, течениями, поверхностными волнами. Если дрейф пленки нефти происходит под действием ветра и течений, не вызванных прямым

действием ветра, скорость дрейфа равна арифметической сумме скоростей:

$$U = U_w + 0,56 U_C,$$

где U_w — скорость ветрового дрейфа, U_C — скорость дрейфа, вызванного течениями. Определяющую роль в дрейфе пленки играет ветровой дрейф. Скорость ветрового дрейфа составляет около 3% от скорости ветра. Под действием силы Кориолиса направление дрейфа отклоняется от направления скорости ветра, угол отклонения составляет от 0 до 100°.

После прекращения растекания дальнейший рост площади нефтяного загрязнения будет происходить под действием турбулентной диффузии. Диффузия нефтяных загрязнений отличается от диффузии консервативных пассивных примесей. Неконсервативность нефтяной пленки обусловлена испарением, растворением нефти и биодegradацией, в процессе диффузии происходит изменение химического состава пленки. Поэтому необходимо подходить с осторожностью к перенесению результатов опытов по горизонтальной турбулентной диффузии с различными красителями на диффузию нефтяного пятна. Следует отметить, что в случае нефтяной пленки имеет место горизонтальная диффузия, а для нефти в диспергированном состоянии диффузия будет трехмерной.

Поверхностные волны оказывают значительное влияние на нефтяные загрязнения. Волны являются причиной волнового дрейфа, вызывают перемешивание нефти при обрушении волн, изменяют толщину нефтяного slicka над различными участками волны. Волновое движение создает в приповерхностном слое волновое течение, обусловленное нелинейными эффектами. Скорость течения определяется формулой Стокса.

Исследование дрейфа нефти под воздействием волн и при совместном воздействии волн и ветра проводилось пока только в лабораторных работах. Оказалось, что в этом случае скорость волнового дрейфа превышает значение скорости Стокса. Скорость волнового дрейфа во всех случаях составляет менее 20% от скорости ветрового дрейфа. Отметим, что эти результаты получены в лабораторных условиях при малых разгонах. Соотношение между скоростью чисто ветрового дрейфа и скоростью волнового течения зависит не только от скорости ветра, но и от стадии развития волнения.

Поверхность океана при определенных ветровых условиях покрыта значительным числом обрушивающихся волн, которые

влияют на перемешивание нефти и распыливание нефтяных сликов. В свою очередь нефтяные слики уменьшают частоту обрушения волн. Разрушение волны на нефтяном слике приводит к перемешиванию нефти в водяном столбе, плавучесть частиц нефти вызывает подъем ее частиц на поверхность. Баланс сил, приводящих к заглублению и к подъему нефти, определяет время нахождения ее частиц в воде. Непосредственно влияние загрязняющих веществ, в частности нефти, на обрушение волн сохраняется до тех пор, пока не нарушена целостность поверхностных пленок. При сильных ветрах поверхностный слик разрушается, в слое ветрового перемешивания образуется эмульсия нефти в воде, влияние которой на обрушение волн незначительно. Увеличение вязкости в приповерхностном слое из-за образования эмульсии приводит к незначительному ослаблению высокочастотных составляющих спектра волн. Проникновение нефти в глубину сопровождается пространственной дифференциацией частиц нефти по размерам и нефтяных углеводородов по химическому составу.

Волны способны изменять толщину нефтяного слика над ними. Измерения толщины слоя нефти над волновой поверхностью (если толщина слоя более 1 мм) в лабораторных и натурных условиях показали, что слой нефти становится более толстым над гребнями волн и уменьшается над впадинами. Этот эффект был установлен в случае волн без встра. Исследования показывают, что напряжение трения и давления в ветровом потоке могут приводить к перераспределению слоя нефти над волновой поверхностью. Слик, имеющий большие пространственные размеры, приводит к изменению характеристик пограничного приводного слоя: изменяется шероховатость водной поверхности, коэффициент сопротивления, скорость трения, скорость ветра в приводном слое. В результате изменяется поступление энергии от ветра к поверхностным волнам и течениям, нарушаются газообмен и влагообмен пограничных слоев. Использование в сельском хозяйстве ПАВ для уменьшения испарения с водоемов небольших размеров — хорошо известный факт. Таким образом пленочные загрязнения значительных акваторий морей могут существенно нарушить механизмы взаимодействия атмосферы и океана.

Экологические последствия морских геолого-геофизических исследований

Современные морские геолого-геофизические исследования проводятся с палубы судна, а также с помощью подводных

обитаемых и необитаемых аппаратов. Они включают в себя геоморфологические, геомагнитные, гравиметрические, сейсмические, сейсмологические, геотермические электромагнитные исследования, драгирование коренных пород дна, сбор образцов донных осадков, глубоководное бурение дна океана. В последнем случае проводятся, как правило, и внутрискважинные геофизические исследования.

Сам процесс исследований проходит с той или иной степенью вмешательства в природную среду. Вопрос о количественной оценке загрязнения природной среды процессом геолого-геофизических исследований в настоящее время еще находится на уровне постановки проблемы (А. А. Шрейдер, Ал. А. Шрейдер, 2000).

Экологические последствия геоморфологических, гравиметрических и геомагнитных исследований, проводимых по ходу судна, не намного превышают те, что имеют место при обычном движении судна.

Сейсмические исследования предполагают буксировку за кормой судна источников сигналов и буксировку гирлянды приемных датчиков (сейсмических кос). Длина кос при различных модификациях сейсмических исследований меняется от 200–500 м до 2–6 км. Экологические последствия такой буксировки для водной массы несколько превышают те, что наблюдаются при буксировке гондол магнитометра.

Источниками сейсмических сигналов в море первоначально служили глубинные бомбы (иногда сбрасывавшиеся даже с вертолетов), тротилловые шашки, электрические разряды большой мощности и т. п. Использование такого рода источников приводило к неисчислимым бедствиям на поверхности и в глубинах моря для его обитателей. Прямой экологический вред и потенциальная опасность для любых живых организмов (известны случаи прямой гибели людей при производстве морских сейсмических исследований) заставили отказаться от использования вышеуказанных источников сейсмических сигналов и привели к разработке менее опасных способов возбуждения сигналов. Среди них наибольшее распространение в настоящее время получили воздушные пушки разных объемов, «стреляющие» сжатым воздухом.

Степень сжатия воздуха и объем пушки обуславливают ее тротилловый эквивалент, иногда достигающий нескольких сотен или даже тысяч грамм. К числу наиболее губительных для подводного мира последствий относится гидродинамический удар,

сила которого и радиус действия определяется тротиловым эквивалентом. Степень такого вреда определяется количеством особей рыб, оказавшихся в радиусе действия (до нескольких сотен метров) гидродинамического удара. В меньшей степени изучено влияние удара на планктонные сообщества. Совершенно не изучен вопрос о степени опасности частотного состава колебаний частиц воздушной и водной масс при пушечном выстреле.

Современная техника сейсмических импульсов, выпускаемых каждые несколько десятков секунд гирляндами из многих пневмо-гидропушек (каждая пушка при этом может создавать эффект гидроудара с давлением до 100–150 атм), представляет угрозу для морской биоты, в том числе для промысловых ее видов. Масштабы таких действий весьма значительны. За летний сезон геофизической съемки одно сейсморазведочное судно с буксируемым шлейфом тросов, кабелей, пушек, гидрофонов, протягивающихся на несколько сотен метров или километров проходит маршрут около 10 000 км, а количество пневмовзрывов составляет не менее 3 млн. Если исследования носят площадной характер и проводятся в ограниченном районе, то степень опасности для биоты в районе исследований многократно возрастает за счет регулярности воздействия такими взрывами в ограниченном по площади районе, приводя к качественному ухудшению среды обитания биологического сообщества. Опасность достигает максимума при работах в местах нереста или нахождения косяков рыб.

Природоохранные и рыбохозяйственные службы Великобритании, Норвегии, Канады рассматривают геофизические изыскания на шельфе как серьезный поражающий фактор, оказывающий губительное воздействие на промысловые организмы (особенно в период нереста и пагула), и потому сейсмические работы жестко регламентируются и контролируются вплоть до обязательного присутствия инспекторов рыбоохраны на борту судов. В Северном море введен запрет на сейсмические работы с июля по сентябрь в районах нереста сельди. В экономической зоне на шельфе Норвегии с целью ограничения районов и сроков сейсморазведки были введены специальные исследования и выполнено картографирование акватории с выделением районов повышенного риска от сейсмических исследований. Эти районы включают ареалы нереста и пути миграции икры, личинок и молоди промысловых рыб. Норвежские специалисты обнаружили способность стайных пелагических рыб (прежде всего сельди) реагировать на сейсмосигналы на удалении до 10 км от источника таких сигналов. Было установлено снижение уловов

промысловых видов рыб на 70% за счет поражающего действия на рыбные популяции интенсивных сейсмических исследований у берегов Норвегии.

Механизмы и проявления биологического действия ударных волн на живые организмы могут быть самыми различными: от поражения систем ориентации и поиска пищи (зрение, слух, обоняние) до физических повреждений органов и тканей, нарушения двигательной активности и гибели. Особенно уязвимы рыбы на ранних стадиях развития (личинки, молодь). Радиус сплошного поражения с летальным исходом при проведении сейсмических работ пневмопушками, электроискровыми источниками составляет 0,5–1 м. На расстоянии свыше 2,5 м гибель рыбы на месте прекращается. При взрывах зарядов взрывчатых веществ с эквивалентной массой (менее 25 г) радиус летального поражения возрастает до 10 м. На расстояниях, превышающих 18 м, гибели рыб на месте не происходит.

В литературе приведены данные о гибели 90% личинок, мальков и даже взрослых рыб в радиусе до 2 м от пневмоисточников и отмечены сильные поражения рыб (кровоизлияния, паралич, потеря зрения) в зоне до 4 м от источника ударных волн. Безопасный радиус для зоопланктонных организмов и ихтиопланктона в зоне действия пневмоизлучателей с рабочим давлением 140 атм находится в пределах 5–7 м, а для донных организмов и фитопланктона в пределах 2 м. Отметим, что указанные цифры получены для одинокого источника сейсмосигналов и нет даже оценок воздействия на биоту гирлянд (например, 30–40) пневмоисточников, а также использования новых систем гидропушек, способных уничтожать молодь рыб на расстояниях до 10 м.

Отмечается повышенная чувствительность к действию взрывных волн рыб, имеющих плавательный пузырь (к таким рыбам относятся практически все целагические виды), а также обратная зависимость этой чувствительности от веса рыб.

Электромагнитные исследования дна проводятся с помощью постановки донных приемоизлучающих станций и раскладки приемоизлучающих кабельных антенн. Степень экологических последствий работы донной станции и кабелей на дне определяется временем их нахождения на нем и, в целом, сравнима с последствиями работы сейсмологических станций. Совершенно не изучен вопрос о степени опасности величины и частотного состава электромагнитных импульсов для биоты окружающей водной толщи и прилегающих участков дна.

Понятно, что наибольшую опасность в экологическом отношении представляют собой способы, при которых в толще воды или на дне создаются искусственные электрические поля, интенсивность которых значительно превосходит соответствующие параметры природных полей. При работе в морской среде измерительных и генерирующих электроразведочных систем создаются постоянные или переменные электрические поля с помощью токов силой 200–1000 А, причем полярность этого тока и периодичность его включения изменяются в процессе съемки. Имеющиеся немногочисленные оценки показывают, что постоянные электрические поля в морской среде вызывают у рыб принудительные реакции, которые развиваются по мере нарастания силы тока от первичных симптомов при градиентах потенциала 1–10 мВ/см до сильных повреждений и гибели рыб в течение минуты при достижении градиента в 1 1,5 В/м. По некоторым оценкам, негативный эффект должен быть более значителен для развивающейся икры рыб.

Геотермические исследования дна проводятся с помощью температурных датчиков, устанавливаемых на донных прямоточных трубках. Данный способ исследования относится к числу комбинированных, поскольку одновременно с помощью прямоточной донной трубки производится отбор проб осадочного материала для геологических целей. Отобранные пробы осадков служат не только для изучения процессов седиментации, но и для измерения теплопроводности осадочного материала и последующего расчета величины теплового потока через морское дно. В процессе исследований нарушается сплошность осадочного покрова на глубину до 10 м при диаметре трубы до 15 см. Можно полагать, что экологические последствия этого процесса не существенны для окружающей среды.

Изучение физических свойств коренных пород дна ведется на материалах, полученных в процессе драгирования образцов коренных пород дна в дрейфе судна. Драгирование проводится с помощью специальных металлических конструкций, позволяющих отдирать, отбивать, отрывать и собирать в металлическую сеть оторванные от коренного залегания образцы твердых пород. В процессе драгирования на площади соприкосновения драги с дном происходит уничтожение практически всех форм донной фауны, раковин, нор и т. д. При подъеме драги осадочный материал и твердые частицы небольшого размера вымываются из драги и способствуют загрязнению всей толщи (в первую очередь, придонного слоя) вод. Совершенно не изучен вопрос

об экологических последствиях процесса сбора каменного материала. Можно лишь полагать, что эти последствия, хотя и лимитированы в пространстве, по достаточно серьезны или даже губительны для вовлеченного участка окружающей среды.

Глубоководное бурение дна проводится с судна, удерживающегося в одной точке с помощью подрабатывающих винтов, управляемых компьютером, использующим данные спутниковой навигации. В результате бурения происходит локальное (в кругу радиусом в несколько десятков сантиметров) нарушение сплошности дна на глубину до 1000 м или более. С судна в скважину закачиваются компоненты бурового раствора, облегчающего процесс бурения. На поверхность дна из глубины скважины проникают различного рода гидротермальные растворы. Процесс опускания и подъема колонны бурильных металлических труб и геофизических приборов для проведения внутрискважинных геофизических исследований приводит к принудительной циркуляции жидкости внутри и в устье скважины, способствуя дополнительному проникновению чуждых примесей в придонный слой. Забой скважины может пропикнуть в нефтяные, газовые (или иного толка) скопления, которые в силу меньшей плотности по скважине достигнут дна и будут способствовать загрязнению не только дна, но и всей толщи вод, включая морскую поверхность, на многие километры вокруг. Эти обстоятельства являются важнейшими факторами загрязнения окружающей среды. Вопросы ликвидации последствий загрязнения окружающей среды при бурении скважин в море на больших глубинах относятся к слабоисследованным. Их решение нередко определяется техническими возможностями работы человека на глубине.

Особое место занимают разного рода приспособления по добычи со дна полезных ископаемых в виде железомарганцевых корок и конкреций. Известны способы, основанные на сгребании «механическими руками» верхнего слоя осадков с конкрециями в полосе до 20 м (при этом уничтожается все живое на дне в полосе захвата «рук») и подъеме собранного материала с глубин в несколько километров вверх по принципу пылесоса. На палубе поднятый грязеподобный материал проходит сквозь сито. Конкреции, корки и кампиды, донная фауна задерживаются в сите, а весь остальной материал смывается обратно в море, формируя в толще морской воды многокилометровый шлейф из материала осадочных пород. Процесс осаждения их на дно занимает многие часы и дни, нарушая экологию морских вод даже в открытых частях океана. Отметим, что столь же опасен для донных сообществ и процесс ловли рыб донными травами. В результате

контакта тралов с дном его поверхность перенахивается, рассекается многочисленными бороздами и в ряде случаев напоминает безжизненное поле (в сравнении с другими участками дна) при взгляде из иллюминатора подводного обитаемого аппарата.

Известны способы добычи полезных ископаемых из минеральных рассолов на дне моря, богатых растворенными солями металлов, с помощью принципа пылесоса. Отработанная жидкая пульпа сливается судном обратно в море, способствуя обогащению водной толщи не свойственными ей химическими элементами. Степень ущерба окружающей морской среде зависит от химического состава сливаемой пульпы и концентрации химических элементов в ней.

Инженерные работы на дне, связанные с прокладкой траншей для трубопроводов, полным или частичным удалением оснований стационарных платформ, сооружений из бетона и стали, весящих тысячи тонн, невозможно без применения взрывных веществ. Данный фактор относится к кратковременным, часто разовым, мощнейшим воздействиям на морскую среду и биоту, которые необходимо учитывать в случае ликвидации многочисленных сооружений нефтегазового комплекса. Прогнозы гибели морских организмов, особенно рыб, при взрывных работах затруднены из-за неоднородности распределения рыб и особенностей их стайного поведения. Оценочные расчеты показывают, что при одиночном подводном взрыве мощностью 1 000 2 000 кг тринитротолуола масса погибшей рыбы скорее всего не будет превышать 20 т.

В 1992 г. в Мексиканском заливе у берегов Луизианы и Техаса при подрыве более 100 стационарных платформ было использовано более 12 т зарядов. Общее число всплывших рыб, в основном окуневых, составило около 51 тыс. экземпляров. Понятно, что многие экземпляры могли не всплыть или не попасть в зону визуального наблюдения.

Определенное влияние на биоту должны оказывать электромагнитные поля вокруг трансокеанских кабелей связи, общая длина которых достигла ста тысяч километров. Для работы на кабели подавалось напряжение до 5 000 вольт. В последнее десятилетие значение трансокеанских кабелей уменьшается в связи с прогрессом в области спутниковых систем связи. Поэтому в настоящее время рассматриваются и осуществляются проекты использования этих кабелей для электромагнитных зондирования или для проведения сейсмологических исследований.

Экологические последствия применения различных геолого-геофизических методов исследования в море не одинаковы. Количественные оценки их влияния на жизнь биологического сообщества носят самый предварительный характер. Наименьшие последствия имеют геоморфологические, геомагнитные и сейсмологические исследования, а также исследования с помощью глубоководных необитаемых буксируемых аппаратов.

Несколько более серьезными последствиями могут характеризоваться геотермические и электромагнитные исследования, а также работы, связанные с применением подводных обитаемых аппаратов.

Наиболее серьезные последствия могут быть связаны с проведением инженерных взрывов, сейсмических исследований с применением воздушных пусек большого объема, драгированием коренных пород дна и реализацией проектов добычи со дна разнородных полезных ископаемых. Столь же серьезными могут быть последствия глубоководного бурения в океане. Справедливости ради отметим, что процесс бурения весьма дорогостоящий и, как правило, предваряется тщательным изучением геолого-геофизической ситуации в районе выбранной скважины.

Глава 20

Проблема глобального потепления

Глобальное изменение климата стало одной из главных научных проблем человечества. В 1990 г. сорок девять выдающихся ученых мира обратились к мировому сообществу с призывом ограничить выбросы в атмосферу парниковых газов, так как, по их мнению, глобальное потепление, обусловленное этими выбросами, представляет собой самую серьезную экологическую проблему человека [31]. В этом же году крупнейшие климатологи планеты подготовили доклад для Межправительственной группы экспертов по проблемам изменения климата, образованной Генеральной Ассамблеей ООН, в котором пришли к заключению, что выбросы в атмосферу парниковых газов приводят к дополнительному нагреву земной поверхности. По мнению экспертов, при сохранении современных темпов потепления через полвека на планете может быть достигнута температура, которой не знало человечество за весь период своего существования. В конце 90-х гг. категоричность мнения о глобальном потеплении ослабла, широкое распространение получила, прежде всего среди ученых, точка зрения о недоказанности исключительно антропогенного происхождения глобального потепления и его реальности.

С конца XIX века, когда появились первые метеорологические станции, проводятся систематические измерения температуры приповерхностного воздуха. За прошедшие сто с лишним лет непрерывных метеорологических измерений был отмечен заметный рост средней температуры на величину около одного градуса. На рис. 20.1 приведены данные о вариациях глобально осредненной температуры приповерхностного воздуха. За нулевой уровень здесь принята средняя температура за период 1951–1980 гг. Глобальное осреднение подразумевает осреднение по всем точкам измерений на поверхности планеты, кроме того здесь проведено осреднение по времени на интервале одного года. Приведенные данные о глобально осредненной температуре представляют собой экспериментальную основу, подтверждающую проблему глобального потепления.

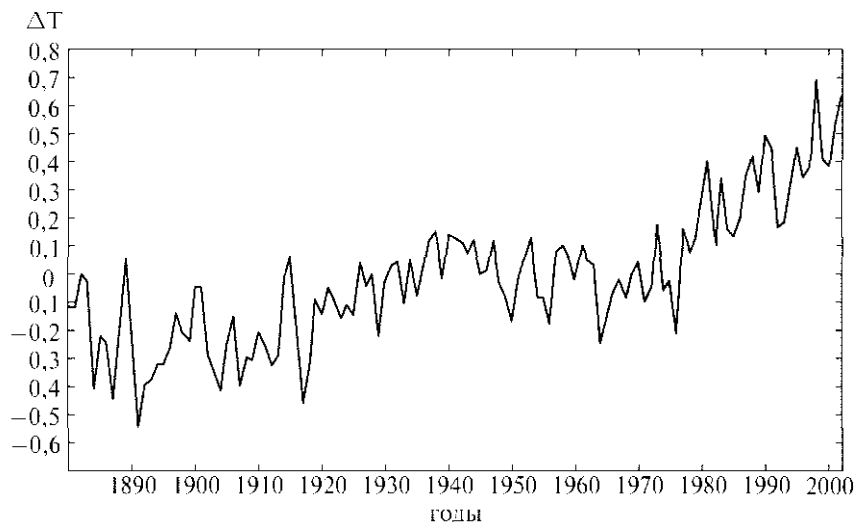


Рис. 20.1. Вариации глобально осредненной температуры приповерхностного воздуха. Средняя температура за период 1951–1980 гг. принята за нулевой уровень

Механизм парникового эффекта заключается в следующем (рис. 20.2). Земля находится под воздействием потока излучения Солнца (основной энергетический вклад в поток космического излучения дает Солнце). Излучение Солнца близко по своему спектральному составу к излучению абсолютно черного тела при температуре около 6000 К. Атмосфера Земли, ее поверхность частично отражают падающее излучение, частично поглощают.

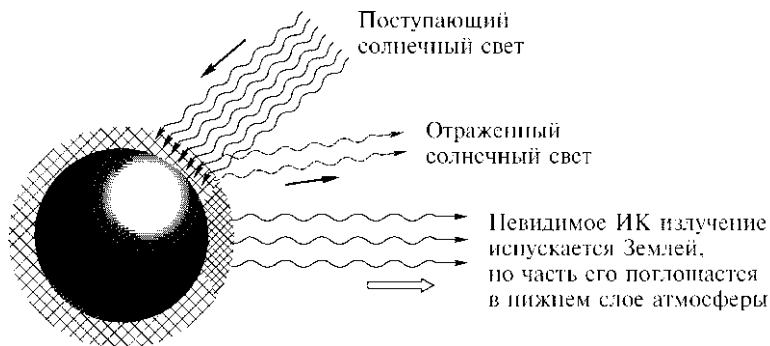


Рис. 20.2. Механизм парникового эффекта [31]

Поглощение энергии вызывает нагрев земной поверхности. Средняя температура земной поверхности составляет около 300 К. Земная поверхность также излучает, но так как ее температура много ниже солнечной, основное излучение энергии происходит на частотах инфракрасного диапазона. Часть этого излучения поглощается парниковыми газами атмосферы. Парниковые газы пропускают излучение в видимом диапазоне и поглощают в инфракрасном. Таким образом, парниковые газы удерживают на Земле дополнительное количество энергии.

Парниковые газы — это газы, задерживающие инфракрасные лучи, которые нагревают поверхность Земли и атмосферу. Наиболее важными парниковыми газами являются пары воды, двуокись углерода, метан, окись азота, озон, фреоны. Парниковые газы могут иметь естественное (природное) и антропогенное происхождение. Соответственно следует различать естественный парниковый эффект и вклад в парниковый эффект, обусловленный газами, поступившими в атмосферу в результате человеческой деятельности. Двуокись углерода (CO_2) является основным антропогенным парниковым газом. Около 80% углекислого газа образуется в результате сжигания ископаемого топлива, остальная часть приходится на вырубку лесов, прежде всего тропических. Окись азота (N_2O) образуется при сжигании ископаемого топлива, биомассы, применения удобрений.

Метан антропогенного происхождения поступает в атмосферу при утечке газов на трубопроводах, образуется на рисовых полях. Среди источников поступления метана в атмосферу залежи газгидратов представляют значительный интерес, так как они оцениваются как важный дестабилизирующий фактор, который может привести к разогреву атмосферы [90]. Вклад метана в прирост температуры оценивается в четыре раза меньше вклада CO_2 , однако скорость поступления метана в атмосферу превышает скорость поступления CO_2 . Степень влияния метана на потепление также выше степени влияния CO_2 , что обусловлено важной ролью метана в формировании облачности. Согласно некоторым оценкам, в XXI в. метан будет определяющим парниковым газом. Газгидраты — льдоподобные составы углеводородных газов и воды. В 1 м³ газгидрата содержится до 160 м³ метана и 0,8 м³ воды. Устойчивость газгидратов обеспечивается низкими температурами и высоким давлением, поэтому они существуют в районах вечной мерзлоты на глубинах больше 100–200 м, и на континентальном склоне на глубинах выше 300 м. Глобальное потепление может привести к поступлению в атмосферу метана

из этих огромных залежей. Исследования показывают, что наряду с постепенным поступлением метана в атмосферу, возможны выбросы значительных масс метана, что может привести к катастрофическим последствиям.

Скорость роста содержания в атмосфере углекислого газа составляет около 0,5% в год. Для метана, оксида углерода и оксидов азота — примерно 1% в год. Еще быстрее растет концентрация хлорфторуглеродов. Количество метана в атмосфере удвоилось за последние 200 лет. Концентрация оксидов азота выросла в два раза менее чем за 100 лет. Почти удвоилось по сравнению с доиндустриальной эпохой содержание углекислого газа. Во много раз увеличилась концентрация в воздухе ряда органических и неорганических соединений, в том числе синтезированных искусственно.

Если бы парниковые газы отсутствовали, то температура Земли была бы более чем на 30 °C ниже. В гл. 12 была приведена оценка температуры Земли в отсутствие атмосферы. Согласно этой оценке, средняя температура Земли составляет около 255 К, что значительно ниже реальных средних температур 285–290 К. Наличие атмосферы с поглощающими инфракрасное излучение парниковыми газами существенно меняет температурный баланс. В гл. 14 был рассмотрен усредненный радиационно-тепловой баланс, известный по данным многочисленных измерений. Земля излучает в атмосферу 115% ИК излучением плюс 29% энергии скрытым и явным теплом, что составляет 144% от величины энергии падающего на Землю высокочастотного солнечного излучения. Как уже отмечалось выше, противоречия с законом сохранения энергии здесь нет, просто между поверхностью Земли и атмосферой вследствие парникового эффекта возникают встречные потоки энергии, которые дополнительно нагревают атмосферу и поверхность Земли. Атмосфера излучает в ИК диапазоне 170% (67% безоблачная атмосфера и 103% облака) энергии от первичного солнечного излучения. Оценки температуры эквивалентных равновесно излучающих «серых» тел дают соответственно $T \approx 280$ К для поверхности Земли и $T \approx 290$ К для атмосферы. Данные оценки близки к реальным средним температурам, однако более точный анализ должен учитывать многие факторы, в частности, неравновесность излучения, процессы переноса излучения, тепла, импульса и т. д.

Климат Земли определяется не только атмосферными процессами. В формировании климата участвуют океан, криосфера

(ледовое покрытие планеты), литосфера, растительный и животный мир (биота). Рассмотрим простейшую модель изменения температуры Земли [21, 29].

Интегральные характеристики теплообмена в системе Земля–Космос можно грубо оценить, считая Землю точечным объектом. Тогда можно написать уравнение, описывающее температуру Земли, в следующем виде:

$$C \frac{dT}{dt} = (1 - A)P - 4\pi\sigma\epsilon R^2 T^4,$$

где C — теплоемкость Земли, ϵ — коэффициент, учитывающий отличие земной поверхности от абсолютно черного тела, P — мощность падающего на Землю излучения. Коэффициент отражения A является функцией температуры, причем эта зависимость более сильная, чем зависимость от температуры C и ϵ . При $T = 0$ земная поверхность будет покрыта льдом, поэтому член $(1 - A)P$ будет достигать минимума. С увеличением T данное слагаемое монотонно растет. Анализ зависимости $C \frac{dT}{dt}$ от T дает три стационарных состояния $T_a < T_0 < T_b$, в которых $C \frac{dT}{dt} = 0$. Два стационарных состояния системы T_a, T_b являются устойчивыми, третья (T_0) — неустойчивое.

Состояние T_a соответствует глобальному оледенению, T_b — межледниковому периоду (современный климат). Механизм перехода между стационарными состояниями можно описать введением климатического потенциала:

$$U(T) = -\frac{1}{C} \int_0^T [(1 - A)P - 4\pi\sigma\epsilon R^2 T^4] dT.$$

Тогда изменение температуры описывается выражением:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\delta U}{\delta T}.$$

Описание изменения температуры климатической системы Земли принимает форму, подобную движению частицы в потенциальной яме. Отметим, что даже такое упрощенное представление приводит к выводу, что климат Земли является неоднозначным. Например, при данном значении солнечной постоянной и при существующем химическом составе сухого воздуха кроме современного климата мог бы иметь место совершенно другой климат, в частности, так называемый климат «белой Земли».

Дополнительно отметим, что знак изменения планетарного альбеда при больших температурах в настоящее время не определен. Иными словами, остается неясным, будет облачность с температурой увеличиваться или уменьшаться.

В случае воздействия периодического внешнего возмущения даже небольшой амплитуды, имеющего резонансный период, т. е. период, близкий ко времени перехода между стационарными состояниями, возможен переход из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние. Известно несколько астрономических глобальных циклов, обуславливающих изменения потока солнечной радиации, среди них главные: прецессия оси вращения Земли с периодом около 22 000 лет, изменение наклона оси прецессии Земли к плоскости эклиптики с периодом $\approx 41\,000$ лет, изменение эксцентриситета орбиты Земли с периодом $\approx 100\,000$ лет. Оказалось, что период изменения эксцентриситета земной орбиты наиболее близок к периоду изменения климата на Земле. Модель, объясняющая изменения климата астрономическими причинами, была создана в 20-е гг. XX в. века Миланковичем. Теоретические расчеты периодов оледенения, проведенные по этой модели, неплохо совпадают с известными экспериментальными данными.

В ледниковые периоды средняя температура земной поверхности уменьшалась примерно на 5°C , уровень океана опускался на 100 м, изменялась система глобальных океанских течений, ледники опускались на широту Москвы и Киева. Сведения о палеоклимате (т. е. климате предшествующих эпох) ученые получают, используя широкий спектр данных. К ним относятся:

измерение температуры в глубоких скважинах и восстановление по ним температуры на поверхности в прошлом;

- анализ кернов глубокого бурения, в том числе в океане. (Анализ кернов льда в Антарктиде позволяет определить не только температуру, но и содержание двуокси углерода в атмосфере в предшествующие периоды. На станции «Восток» в 1970 г. было начато бурение скважины, достигшей к концу 1997 г. глубины более 3 600 м. Анализ кернов позволил получить детальную информацию о глобальных изменениях климата на протяжении 420 тыс. лет.) Отмечается устойчивая связь между колебаниями уровня моря, изменениями температуры и вариациями содержания парниковых газов;

- анализ осадочных пород (содержащих раковины планктона) позволяет определить температуру воды в палеоклимате;
- анализ моренных отложений, по которым определяют границы распространения ледников.

В межледниковые периоды концентрация CO_2 в атмосфере была примерно 280 ppm (ppm – число частиц на миллион), а в ледниковые периоды уменьшалась до 180–210 ppm. В настоящее время концентрация CO_2 превысила 350 ppm. Такая концентрация CO_2 никогда за время существования человечества не достигалась. Значительная часть ученых этот рост концентрации связывает с деятельностью человека, прежде всего с использованием ископаемого топлива. Увеличение содержания CO_2 в атмосфере приводит к росту температуры на Земле. В настоящее время скорость увеличения средней температуры выше в $10-10^2$ раз скорости изменения температуры в предшествующие моменты перехода от ледникового периода.

Среди факторов, которые приводятся как подтверждение увеличения средней температуры на планете, можно отметить следующие.

Хорошо зафиксированный рост средних температур в озерах США и Канады. Считается, что состояние озер хорошо отражает изменения климата. Еще А. И. Воейков указывал, что озера являются продуктом климата. Однако характеристики озер (уровень воды, средняя температура, время вскрытия льда и др.) могут не отражать линейно медленные изменения климата, а зависеть от реакции динамической системы озера на вариации теплофизических свойств, которые, в свою очередь, обусловлены климатическими изменениями. Например, Н. Н. Филатов [141] приводит данные, которые свидетельствуют о росте средней температуры в Восточной Финляндии (северо-восток Скандинавского полуострова, Карелия) (рис. 20.3). Так, продолжительные наблюдения на Онежском озере с 1880 по 1990 г. показали, что число дней, в течение которых озеро свободно ото льда, возросло с 217 до 225 дней. 300-летние наблюдения на одной из рек Финляндии показали, что время вскрытия реки изменилось с 22 мая на 10 мая (рис. 20.4). Анализ показывает, что период времени, в котором крупнейшие озера Северного полушария свободны ото льда, совпадает с изменением температуры воздуха. Повышение температуры земной поверхности приведет к увеличению стока рек в высоких широтах, изменится влагосодержание почв.

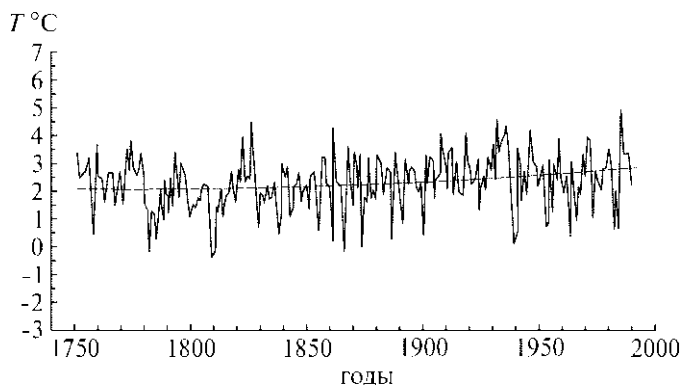


Рис. 20.3. Изменение температуры воздуха в Карелии (Петрозаводск) за 1752–1993 гг. [141]

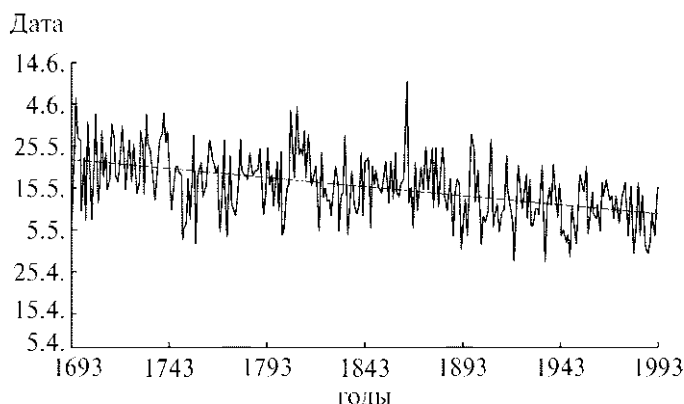


Рис. 20.4. Время вскрытия ледяного покрова на р. Кемийоки в Финляндии по данным наиболее длительной серии наблюдений с 1693 по 1993 г. [141]

В скандинавских странах могут быть получены дополнительные доходы за счет увеличения возможностей гидроэнергетики. В средних широтах речной сток уменьшится. Например, при повышении температуры воздуха до 3°C прогнозируется уменьшение уровня воды в Великих Американских озерах на 1–2 м. Такое изменение уровня существенно нарушит условия эксплуатации водных путей, приведет к значительным экономическим затратам.

Сокращение числа айсбергов в Северной Атлантике. Уменьшение толщины морского льда в Северной Атлантике. Измерения толщины льда, проведенные с помощью английской подводной лодки севернее Гренландии, показали, что толщина льда за десять лет уменьшилась с 6,7 до 4,5 м.

Уменьшение годового максимального ледового покрытия в Арктике и Антарктике. Рост числа айсбергов в Южной Атлантике. Рост температуры приводит к необратимым изменениям ледового покрова в Антарктике. Именно в последние годы отмечается отделение гигантских айсбергов от ледового покрытия. Потепление приводит к значительному сокращению плавающих шельфовых ледников. Это сокращение происходит при раскалывании ледников и образовании многочисленных айсбергов. Сокращение шельфовых ледников не вызывает подъема уровня моря. При значительном потеплении возможно исчезновение гигантских шельфовых ледников Росса и Фильхнера. Дальнейшее сокращение ледового покрова может привести уже к сокращению внутриматериковых ледников. Исчезновение преграды в виде шельфовых ледников приведет к сползанию в океан и последующему таянию антарктических глетчеров.

Возрастание числа бурь, наводнений в Европе, Африке, Азии. Перед учеными стоит проблема достоверности этих «свидетельств» глобального потепления. Для получения достоверных инструментальных данных об изменении температуры, которые бы подтвердили или опровергли глобальное потепление, планируется проведение некоторых крупных международных научных экспериментов. В частности, планируется измерение скорости распространения звуковых волн в морской воде. Как известно, скорость звука зависит от температуры, поэтому, наблюдая в течение продолжительного времени распространение звука между двумя точками Мирового океана, можно определить изменение температуры воды океана. В качестве одной такой трассы планируется использовать участок между Аляской и Новой Землей, другую трассу предполагается проложить между Тихоокеанским побережьем США и Гавайскими островами. Однако последний проект вызвал неожиданное сопротивление со стороны защитников животного мира: биологи предположили, что мощное акустическое излучение может оказать нежелательное воздействие на китов и других морских животных.

Однако в настоящее время нельзя считать достоверно установленными причины изменения средней температуры на поверхности Земли. Нет бесспорных доказательств того, что рост средней температуры является следствием антропогенного воздействия. Значительное число ученых придерживается точки зрения, что наблюдаемое изменение средней температуры является главным образом проявлением естественных процессов, а антропогенный вклад оценивается как незначительный. Они считают, что глобальные температуры весьма слабо зависят как от изменения общей солнечной радиации, так и от количества парниковых газов в атмосфере. Климат, по их мнению, зависит в основном от распределения поступающей солнечной энергии, а не от ее количества, перемены же в атмосферной концентрации CO_2 на это влияют слабо. Более того, ряд исследователей подвергает критике выводы и о глобальном потеплении. Об этом будет рассказано ниже.

Сложность получения достоверных прогнозов изменения климата обусловлена рядом факторов. В климатической системе действует множество обратных связей, которые усложняют рассмотрение и пока не исследованы. Вклад антропогенных явлений необходимо оценивать на фоне значительных естественных процессов, многие из которых еще до конца не изучены. Это приводит к тому, что оценки изменения средней температуры на Земле дают значительный разброс (рис. 20.5, 20.6).

Цикл углерода

Важную роль в климатической системе играет цикл углерода [31]. В углеродном цикле связаны в единую цепь важнейшие компоненты климатической системы — атмосфера, биота, океан, литосфера. Антропогенное влияние на углеродный цикл также изучено достаточно хорошо и именно на примере углеродного цикла может быть продемонстрировано «могущество» биоты и человека по воздействию на природные циклы (рис. 20.7).

Биота на суше ежегодно поглощает из атмосферы 10^2 Ггт углерода из углекислого газа (14% общего содержания в атмосфере), который используется в фотосинтезе. В процессе дыхания биота выделяет в форме двуокиси углерода 50 Ггт углерода. Разложение растений поставляет в атмосферу еще 50 Ггт углерода. Таким образом наземная биота удерживает примерно 2 Ггт углерода ежегодно.

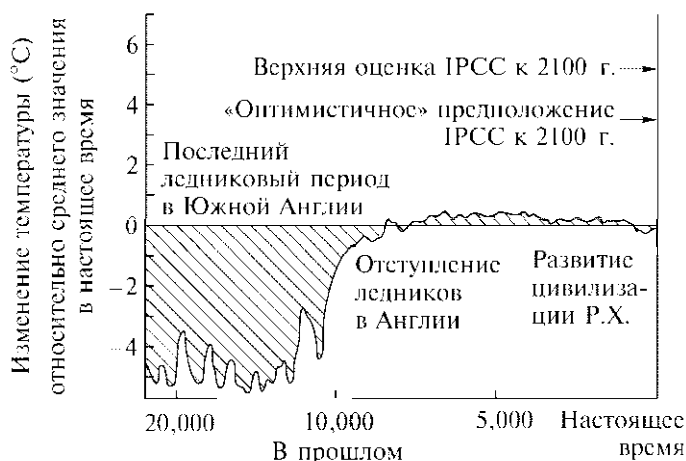


Рис. 20.5. Изменение среднего значения температуры Земли за последние 20 тыс. лет и прогноз ее изменения. Стрелки справа указывают результат прогноза учеными из группы IPCC [31]



Рис. 20.6. Изменение среднего значения температуры Земли за последние 1000 лет и прогноз ее изменения. Черный пик справа указывает разброс результатов прогноза изменения средней температуры Земли к 2100 г. учеными из группы IPCC [31]

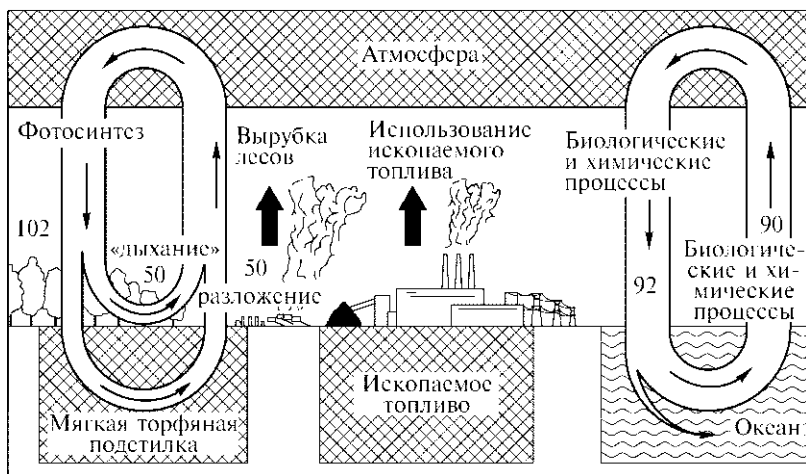


Рис. 20.7. Цикл углерода, показывающий его главные потоки и источники. Цифры указывают годовые потоки в Ггт [31]

Поверхностный слой океана в результате биологических и химических процессов поглощает 92 Ггт углерода. Дыхание фотопланктона, диффузия выделяет с поверхности океана около 90 Ггт углерода. Таким образом океан тоже ежегодно изымает из атмосферы 2 Ггт углерода. Поглощение углерода в наземной биоте и в океане уравнивается периодическим поступлением углерода в составе CO_2 в результате вулканической деятельности. Поэтому в отсутствие антропогенных поступлений в атмосферу CO_2 углеродный цикл на планете находится в равновесии.

Деятельность человека существенно нарушает углеродный цикл. Ископаемое топливо (уголь, нефть, газ) содержит углерод. Уголь представляет собой результат трансформации доисторических остатков растений. Нефть образовалась в результате химических преобразований органических веществ, входивших в состав фитопланктона в древности. Правда, существуют теории неорганического происхождения нефти, согласно которым и сейчас происходит нефтеобразование в недрах Земли. Газ образовался в результате подобных процессов из растений. Ископаемое топливо представляет собой углерод, исключенный из естественного углеродного цикла. Человек, добывая ископаемое топливо и включая его в производственный цикл, нарушил эту консервацию. Сжигание ископаемого топлива приводит к ежегодному поступлению в атмосферу около 6 Ггт углерода. Сжигание лесов приводит к

дополнительному поступлению в атмосферу около 2 Ггт углерода в год. Таким образом, антропогенная деятельность нарушает природный углеродный цикл. Современная концентрация двуокси углерода в 353 ppm означает содержание 750 Ггт углерода в атмосфере. Поступление углерода в атмосферу за последние 100 лет составило около 175 Ггт, в основном это результат антропогенной деятельности. Но на этом влияние человечества на углеродный цикл не исчерпывается. Запасы ископаемого топлива содержат от 5 000 до 10 000 Ггт углерода. В разведанных месторождениях нефти и каменного угля содержится около 4 000 Ггт углерода. Сжигание этих запасов нефти и угля может привести к увеличению содержания углерода в атмосфере до 2 000 Ггт, что в 3 раза больше, чем в настоящее время. Насколько при этом возрастет температура на Земле, сказать довольно трудно. Но следует упомянуть, что в период от 140 до 66 млн лет назад содержание CO_2 в атмосфере было в 4–8 раз больше современного, температура в этот период превышала современную на 10–15 градусов. Отметим, что нет точных оценок скорости поступления CO_2 в атмосферу из глубоких слоев Земли. Скорость прихода CO_2 как для длительных, так и для сравнительно коротких интервалов времени может изменяться в широких пределах из-за колебаний уровня вулканической активности.

Расчеты глобального изменения климата, выполненные с помощью моделей глобальной циркуляции, дают увеличение температуры на 1,5–4,5 градуса при увеличении концентрации CO_2 в 2 раза по сравнению с его концентрацией в доиндустриальную эпоху. Такое увеличение температуры может произойти уже в 2030 г. На рис. 20.8 приведен пример расчета по модели общей циркуляции ИВМ РАН [26] установившегося температурного отклика атмосферы на режим удвоения CO_2 . По горизонтали здесь приведены широты от 90° ю. ш. до экватора и далее до 90° с. ш. По оси ординат отмечена высота атмосферы в километрах. Хорошо просматривается заметное увеличение температуры на 2–3 градуса в нижнем слое тропосферы до высот в 6–10 км. Данный рост температуры несколько больше в Северном полушарии. Выше тропопаузы, наоборот, наблюдается заметное понижение температуры.

Большой разброс оценок изменения температуры между различными моделями в 1,5–4,5 градуса объясняется несовершенством моделей и неопределенностью многих обратных связей

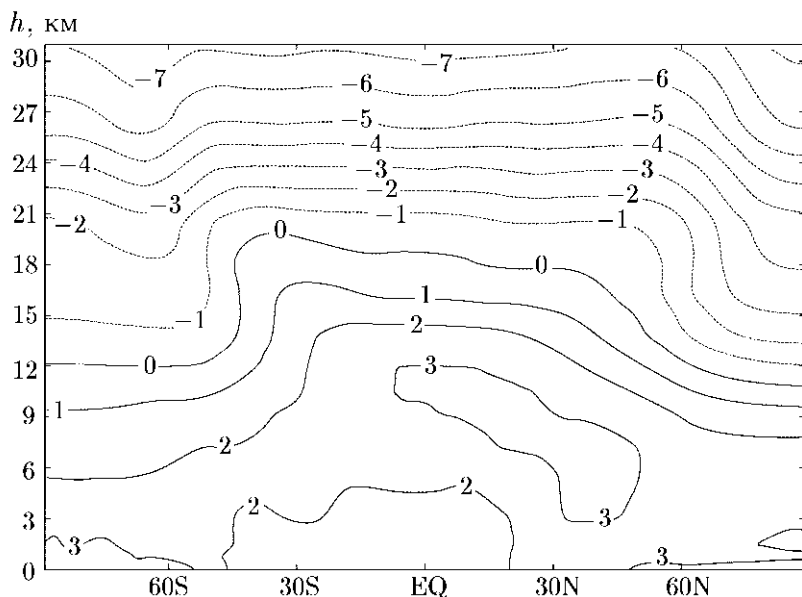


Рис. 20.8. Расчет установившегося температурного отклика атмосферы на удвоение содержания CO_2 по сравнению с его концентрацией в доиндустриальную эпоху в модели общей циркуляции ИВМ РАН [26]

между элементами модели. Обычно модель глобальной циркуляции содержит следующие элементы: блоки циркуляции атмосферы и океана, блок круговорота воды, цикл двуокиси углерода, блоки суши и криосферы. Между физическими, химическими, биологическими процессами, происходящими в различных компонентах климатической системы, существуют сложные взаимодействия (обратные связи). Незнание этих взаимодействий и их упрощенный учет (или пренебрежение ими) в моделях является одной из главных причин разброса в оценках глобального изменения температуры на планете. К основным видам обратных связей между компонентами климатической системы относятся: водяной пар, лед и снег, облака, аэрозольные частицы в атмосфере, температура океана, распределение растительного покрова, органическое вещество и газы в зоне вечной мерзлоты, гидроокиси метана в морях и др.

Покажем, как действуют обратные связи. При глобальном потеплении снег и лед в горных районах и полярных областях

Земли начнут таять. Если сокращение снежного и ледового покрытия уменьшит альbedo Земли, то земная поверхность поглотит большую часть солнечной энергии. Температура земной поверхности возрастет. При охлаждении величина ледового панциря на Земле возрастет, что приведет к росту альbedo и, как следствие, к уменьшению поступления солнечного тепла. Таким образом, эта связь является положительной. Отметим, что в общем случае знак изменения планетарного альbedo может быть и другим, если сокращение снежного и ледового покрова приведет к такому увеличению облачности, которое увеличит суммарное альbedo.

Аналогично температура океана играет роль положительной обратной связи. При росте температуры морской воды растворимость CO_2 уменьшается, а парциальное давление CO_2 на водной поверхности растет. Рост концентрации диоксида углерода приводит к дальнейшему росту температуры. Напротив, при уменьшении температуры воды растворимость CO_2 возрастет, парциальное давление тоже уменьшится, что приведет к дальнейшему падению температуры. Мировой океан является резервуаром гигантского количества CO_2 . Огромные массы воды океана содержат количество CO_2 , в 50 раз превышающее его количество в атмосфере, в 20 раз — в биоте. Огромная емкость океана по CO_2 обусловлена его стратификацией — температура поверхностных вод много выше температуры нижележащих слоев, имеющих температуру около 4°C . Этим объясняется важная роль океана в глобальной климатической системе.

Можно привести примеры и возможных отрицательных связей, стабилизирующих систему геосферы и биосферы. В частности, перестройка океанских течений может резко изменить динамику атмосферы и климат обширных регионов, в том числе и вызвать общее похолодание. Известно, что даже незначительные вариации интенсивности течений под действием вариаций лунных приливов (с периодом 18,6 года) вызывают вариации температур в океане и атмосфере. Реакция биосферы также может существенно влиять на климат. Например, считается, что сильное (45%) изменение содержания CO_2 в атмосфере около 490 млн лет назад (девонский период) связана с эволюцией и заметным ростом корневых систем ряда растений, что привело к более интенсивному извлечению углерода из атмосферного CO_2 . Нельзя исключить и сравнительно быструю эволюцию некоторых составляющих биосферы и в современный период. Кроме того, в настоящее

время биосфера очень быстро меняется под действием антропогенных факторов, что также может существенно влиять на региональный и глобальный климаты.

Глобальное потепление может привести к катастрофическим последствиям на планете. Например, прогнозируемый подъем уровня океана на 40–50 см в ближайшие 50 лет приведет к затоплению прибрежных густонаселенных районов планеты. Только в Китае может быть затоплена территория, на которой проживает около 100 млн человек. Огромные густонаселенные районы Индии, Бангладеш также могут оказаться затопленными. По прогнозам будет затоплена почти вся территория Голландии.

Согласно некоторым оценкам, для некоторых стран глобальное потепление может оказаться полезным [163]. Например, в России климат может улучшиться. Увеличение поверхностной температуры вызовет рост испарения с поверхности морей и океанов. Климат на Земле станет более влажным, произойдет увлажнение климата в засушливых районах Нижнего Поволжья, Северного Кавказа. Общее потепление приведет к медленному продвижению на север границы земледелия. Сократится зона рискованного земледелия на территории нашей страны. Однако сложность обратных связей между элементами климатической системы делает такие прогнозы крайне ненадежными. Можно предположить, что наряду с этими положительными эффектами на территории России могут проявиться отрицательные последствия глобального потепления.

Увеличение концентрации углекислого газа приведет также к росту урожайности большинства культурных растений. Многочисленные натурные и лабораторные эксперименты по выращиванию растений в условиях повышенного содержания CO_2 показали, что увеличение концентрации диоксида углерода способствует более быстрому росту растений, их биомассе и урожаю. Например, согласно оценкам, масса лесов США с 1950 г. выросла на 30%, что, вероятно, вызвано ростом концентрации CO_2 . Напомним, что еще В. И. Вернадский называл диоксид углерода удобрением. Возросшая концентрация CO_2 используется растениями в процессе фотосинтеза. Такой факт, вероятно, генетически обусловлен тем, что предки современных растений возникли и длительное время существовали в условиях концентрации CO_2 , значительно превосходящей современную. Вот таковы возможные и неоднозначные последствия глобального потепления на планете.

В заключение главы приведем кратко возражения против выводов о реальности антропогенного глобального потепления.



Рис. 20.9. Связь продолжительности солнечных-магнитных циклов (правая шкала и тонкая линия) и отклонений средней температуры Северного полушария (левая шкала и жирная линия) от среднего значения температуры

Изменения температуры. Температура Земли испытывает значительные колебания естественного происхождения. Природа этих колебаний еще до конца не изучена. Одной из возможных причин изменения температуры обычно называют изменчивость солнечной активности. Рис. 20.9 показывает высокую корреляцию колебаний температуры Северного полушария и солнечно-магнитной активности. Температуры усреднены по 11-летнему скользящему интервалу.

Существуют многочисленные свидетельства влияния солнечной активности на геофизические процессы и биосферу. Все слышаны об 11-летней цикличности солнечной активности. Еще в начале прошлого века известный английский астроном указал на наличие 11-летней цикличности в ценах на зерно в Англии. Анализ срезов деревьев выявил подобную периодичность в толщине годовых приростов деревьев. Известны исследования А. Л. Чижевского по выявлению 11-летней периодичности в распространении различных болезней и смертности. Наряду с 11-летней цикличностью в солнечной активности существуют и другие периодичности: 22-летние, двухлетние, годовые, 27-дневные и т. п. Физический механизм воздействия солнечной активности на верхнюю атмосферу понятен — электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца непосредственно действует на физические процессы в верхней атмосфере, формируя ее тонкую структуру: слои E , F_1 , F_2 и другие. Непосредственное действие солнечной активности на нижние слои атмосферы невозможно,

так как активные составляющие солнечного излучения поглощаются в верхней атмосфере. Ивашов-Холодный выдвинул гипотезу [56], согласно которой изменение солнечной активности, прежде всего в ультрафиолетовой части излучения, приводит к возмущениям озонового слоя (изменяется концентрация, температура), которые передаются нижележащим слоям атмосферы. Таким образом, в данной модели роль передаточного элемента от верхней атмосферы к ее нижним слоям играет слой озона. Таков один из возможных механизмов действия солнечной активности на атмосферу и биосферу.

Необходимо отметить, что важнейшим парниковым газом является водяной пар, а его роль в системе солнечно-земных связей полностью не исследована. В последнее время получены новые экспериментальные данные, указывающие на особую связь облачного покрова (воды) с солнечной активностью [65]. Тропические широты Земли получают за год примерно в 2 раза больше тепла, чем остальная часть земной поверхности. В тропической части атмосферы содержится основная масса водяного пара атмосферы. Поэтому тропическая зона является более энергонасыщенной, чем внетропические зоны. Так как атмосферная циркуляция обеспечивает перенос водяного пара и в меридиональном направлении, между тропической и внетропической зонами существует взаимная связь. Солнечная активность и космические лучи, вызывая ионизацию воздушных масс на высотах 12–20 км, способствуют образованию ядер конденсации, а затем и облачности. Облачность, в свою очередь, изменяет альбедо, условия поглощения инфракрасного излучения атмосферы и земной поверхности. Гигантские космические ливни могут активизировать этот конденсационный механизм даже в средней и нижней тропосфере. Солнечная активность имеет характерные периоды, близкие к таким атмосферным процессам, как волны Кельвина и Россби, поэтому в системе солнечное излучение (плюс космические лучи) — атмосфера возможно возникновение солнечно-атмосферного резонанса, усиленного конденсационным механизмом. Совместные российско-индийские ракетные эксперименты в экваториальной части Индийского океана подтверждают гипотезу солнечно-атмосферного резонанса. Таким образом, предложен еще один механизм (правда требующий дальнейших исследований), объясняющий изменчивость температуры Земли естественными процессами. Исследования ученых ФИАН и ЦАО [125] подтверждают важную роль космических лучей в атмосферных процессах, несмотря на то, что интенсивность

космического излучения на 5 порядков меньше солнечного излучения. Космические лучи, ионизируя атмосферу, обеспечивают работу глобальной электрической цепи в атмосфере, образование грозового электричества и молниевых разрядов. Экспериментальные данные указывают на сильную связь интенсивности космических лучей и облачности. Наблюдаемые изменения температуры поверхности Земли могут быть обусловлены изменением фонового космического излучения. Кстати, подняв ускоритель на самолете в ионосферу, можно повысить облачность и вызвать осадки.

Измерения температуры поверхности Земли характеризуются существенными неоднородностями, самой яркой неопределенностью является эффект городских «островов тепла» — метеорологи многих стран приводят убедительные доказательства влияния крупных городов, жилых массивов на температуру поверхности. Повышение температуры в районах крупных городов может достигать $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$. Поэтому многие метеорологи считают более достоверным оценки изменения температуры получать на основе измерений температуры нижней тропосферы (до 4 км), а не поверхностных температур. В настоящее время ученые располагают более чем 20-летними рядами температуры нижней тропосферы, полученной на основе спутниковых данных и шаров-зондов, т. е. двумя независимыми способами. Спутниковые микроволновые радиационные измерения (Microwave Sounder Unit), были проведены на спутниках «NOAA-6» и «NOAA-7» [165]. Измерения тропосферной температуры, лишенные неопределенностей, присущих измерениям поверхностной температуры, показывают, что начиная с 1978 г. до 1995 г. средняя температура нижней тропосферы уменьшается! Наклон линий тренда за этот промежуток времени составил для спутниковых данных $-0,045^{\circ}\text{C}$ и для зондовых данных $-0,06^{\circ}\text{C}$ за десятилетие (рис. 20.10). Следует отметить, однако, что результаты этих измерений также подвергаются критике и нет общепринятой оценки достоверности и точности данных измерений [167].

Изменение уровня моря. Частота стихийных бедствий. Наиболее впечатляющий эффект глобального потепления ожидается в связи с подъемом уровня моря. Прогнозируемый подъем может составить 1–2 м, что приведет к затоплению обширных территорий. Затопленной может оказаться зона проживания сотен миллионов человек. Однако выявленные на основе космических измерений изменения уровня моря

Отклонение от среднего
за 1979–1996, °C

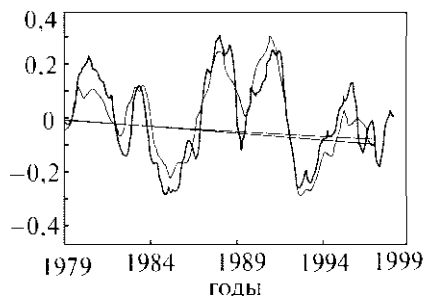


Рис. 20.10. Изменение средней температуры нижней тропосферы между 83° с. ш. и 83° ю. ш. за период с 1979 по 1996 г. Жирная кривая — данные спутниковых измерений (микроволновое зондирование), тонкая кривая — данные радиозондовых измерений. Наклон трендовых линий равен для зондовых измерений $-0,06^{\circ}\text{C}$ и для спутниковых данных $-0,045^{\circ}\text{C}$ в десятилетие

составляют не более 2 мм в год, что значительно ниже колебаний суши, обусловленных геологическими процессами. На несостоятельность прогнозов значительного изменения уровня моря при повышении температуры на $1,5\text{--}4,5^{\circ}\text{C}$ неоднократно указывал академик А. И. Яншин [163].

Изменившаяся частота стихийных бедствий тоже часто подается как следствие глобального потепления. При рассмотрении данного вопроса надо учесть следующие обстоятельства. Во-первых, частота стихийных бедствий связана не столько с геофизическими процессами и явлениями, которые приводят к стихийным бедствиям, сколько с результатом воздействия геофизических процессов на социальные структуры общества, которое часто принимает характер стихийных бедствий. По мере роста городов, развития инфраструктуры общества число геофизических явлений, перерастающих в стихийные бедствия, возрастает. Во-вторых, по мере развития систем связи, создания глобальной системы мониторинга расширилось число регистрируемых стихийных бедствий. На рис. 20.11 показано изменение числа сильных ураганов, прошедших за год в Атлантическом океане, и максимальные скорости ветра в них. Наклон скорости ветра на рисунке для обоих параметров отрицателен, т. е. наблюдается некоторое уменьшение числа ураганов и уменьшение скорости ветра в них.

Содержание CO_2 в атмосфере. Измерения содержания CO_2 в атмосфере действительно указывают на рост концентрации CO_2 в последнее столетие. Ранее приводились данные о росте концентрации CO_2 в этот период. Однако за геологическое время концентрация CO_2 изменялась в очень широких пределах была выше современной более чем на порядок, была и ниже современной. Самое главное, что нет убедительных данных о

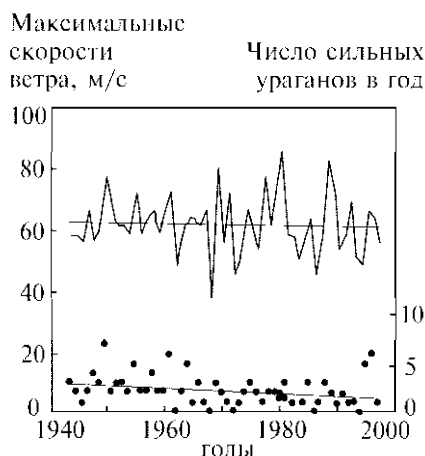


Рис. 20.11. Изменение числа сильных ураганов в год (правая шкала) в Атлантическом океане и максимальной скорости ветра в них (м/с) с 1945 по 1995 г. Наклон средней линии для числа ураганов равен $-0,25$ урагана за десятилетие, для скорости ветра — $-0,33$ м/с за десятилетие

том, что наблюдаемый рост температуры земной поверхности обусловлен ростом концентрации диоксида углерода. Возможно, имеет место обратное влияние — рост температуры вызывает изменение концентрации CO_2 вследствие изменения баланса между атмосферой и океаном. Тем более, что результаты исследований палеоклимата по кернам бурения ледников в Антарктиде и Гренландии показали, что потепления в основном предшествовали росту CO_2 в атмосфере. Кроме того, имеется много различных физических и химических процессов, проходивших в то время, когда пузырьки «старого» воздуха были заключены в лед. Эти процессы, также могли привести к искажению данных.

Отметим еще одно важное обстоятельство, которое не согласуется с гипотезой парникового эффекта: быстрый нагрев в 1910–1930 гг. сменился относительным похолоданием в 1940–1970 гг., хотя при этом содержание парниковых газов быстро росло.

Глобальная проблема антропогенного потепления касается всего человечества и вызывает очень широкий интерес. Природоохранные организации и правительства многих стран пытаются разработать возможные климатологические стратегии. В частности, группа экспертов во главе с известным климатологом Т. Уигли (США) по заданию Межправительственной комиссии ООН по изменениям климата подготовила документ, посвященный борьбе с глобальным потеплением [179]. В документе признается антропогенный характер потепления, что соответствует мнению большинства специалистов. Однако принятие решительных мер против по ограничению выбросов CO_2 в атмосферу предлагается отложить примерно на 30 лет. Авторы документа

считают, что в качестве допустимого максимума концентрации углекислого газа следует установить 550 частей на 1 млн, эта величина значительно выше нынешней (360 частей на 1 млн) и вдвое превышает уровень доиндустриальной эпохи. Такое увеличение допустимого максимума концентрации CO_2 может привести к повышению глобальных температур на 1,5–4,0 °С. Поэтому в будущем могут потребоваться весьма радикальные меры для предотвращения значительного потепления.

По мнению самой Межправительственной комиссии ООН следует срочно начать сокращение антропогенного выброса CO_2 . Однако группа экспертов считает более целесообразным предоставить событиям развиваться «самим по себе» до 2030 г., когда новые «чистые» технологии позволят реально ввести серьезные ограничения. Отсрочка позволит также большему количеству ранее выброшенного CO_2 быть поглощенным водами Мирового океана и растительностью. Отсрочка радикальных мер на несколько десятилетий, в течение которых развитые страны произведут существенное снижение выбросов, позволит сделать данную операцию менее «болезненной», не столь дорогостоящей и легче поддающейся контролю.

Подчеркнем, что нередко к антропогенным воздействиям приписывают и обычные природные процессы. Например, в адрес России неоднократно выдвигались претензии по поводу больших выбросов метана на объектах РАО «Газпром» в Западной Сибири. Между тем уникальные измерения изотопного состава CH_4 в России, проведенные с помощью передвижного вагона-лаборатории, показали, что практически весь метан над Западной Сибирью имеет природное биогенное происхождение и никак не связан с газодобычей. Измерения были проведены сотрудниками Института физики атмосферы РАН совместно с группой специалистов из Института химии Макса Планка (Германия), возглавляемой лауреатом Нобелевской премии П. Крутценом [48]. Иными словами, потери на российских объектах газодобычи примерно такие же, как и на объектах западных стран.

В начале декабря 1997 г. в Киото состоялась Международная конференция по климату планеты. Конференция проходила на уровне министров, отвечающих за вопросы охраны окружающей среды. Задача конференции состояла в принятии согласованных решений о сокращении в ближайшем будущем промышленных выбросов углекислого газа и других парниковых газов атмосферы (метана, оксидов азота). Созыв такой конференции свидетельствует о том, что влияние растущего содержания парниковых газов на потепление климата большинством специалистов

уже не подвергается сомнению. Решения конференции должны стать обязательными для всех государств после их ратификации парламентами большинства стран. По Киотскому протоколу развитые страны взяли на себя обязательство сократить к 2008–2012 гг. выбросы парниковых газов на 5,2% от уровня 1990 г.

В ноябре 1998 г. в Буэнос-Айресе состоялась Международная конференция по глобальному потеплению стран-участниц Конвенции ООН об изменении климата. Как показало обсуждение, большинство государств критически подходят к решениям конференции в Киото и не торопятся выполнять условия Киотского протокола. США, являясь главным поставщиком тепловых загрязнений, отказались подписать протокол. Российская делегация поддержала киотские договоренности. Россия сейчас не выбирает определенную ей квоту, да и промышленного бума в ближайшие годы не предвидится. Большинство развивающихся государств во главе с Китаем и Индией отказываются присоединяться к киотским договоренностям. В странах «третьего мира» доминирует точка зрения, что промышленно развитые страны ответственны за нынешнее состояние атмосферы, и поэтому они должны нести основные расходы по сокращению выбросов, созданию и передаче новых технологий остальным странам. Ранее предлагался и обсуждался выход из существующего сложного положения в создании международной системы купли-продажи национальных квот на выбросы. Однако на пути создания такой системы существует масса экономических, юридических, социальных и других проблем, предстоит согласовать множество противоречивых интересов и устремлений. Большинство европейских стран поддерживают Киотский протокол. Сложность и противоречивость проблемы можно иллюстрировать, в частности, фактом, что нынешняя администрация США во главе с Дж. Бушем выступает против подписания Киотского протокола и против позиции предыдущей администрации. Тем не менее, в настоящее время дискуссии о глобальном потеплении продолжаются на международном уровне, в ходе переговоров предполагается установить верхние пределы концентрации выбросов CO_2 и других парниковых газов на ближайшие годы.

Материал настоящей главы показывает, что проблему соотношения естественных климатических изменений и вызванных человеческой деятельностью нельзя считать решенной. Естественные колебания климата могут замаскировать парниковый эффект. Вопрос упирается в степень чувствительности глобального климата к внешним воздействиям, к интенсивности прямых

или обратных связей, многие из которых мало исследованы в настоящее время. Отсюда все прогностические модели климата содержат много неопределенностей, избежать которых при нынешнем уровне знаний невозможно — на это потребуются многие годы дополнительных исследований. Система геосфер и атмосфера могут реагировать на парниковый эффект сложным нелинейным образом. Для успешного решения проблемы соотношения естественных и антропогенных изменений климата должны быть изучены многие геофизические процессы на Земле и в системе Космос—Солнце—Земля.

Глава 21

Экологические проблемы энергетики

Энергетические проблемы человечества

Для того чтобы представить энергетические потребности человечества и сравнить их с энергетикой процессов, происходящих в геосферах Земли, мы приводим эти энергетические величины в табл. 21.1.

Рассмотрение таблицы показывает, что у человечества есть в резерве мощные источники энергии. Однако их использование, вероятно, является делом далекого будущего. Таблица также показывает, что энергетика техногенных процессов уже стала соизмеримой с энергетикой крупных геофизических процессов.

Материалы данной главы базируются, в основном, на работах [6, 31, 108, 120].

Природные ресурсы широко используются для получения энергии. Ископаемое топливо, радиоактивные элементы, потенциальная энергия воды являются основными видами энергетических ресурсов. При их использовании окружающей среде наносится существенный вред.

Энергетика является основой благосостояния человечества. Во всем мире наблюдается непрерывный рост энергопотребления. Например, в 50–70-х гг. XX в. среднедушевое потребление энергии возросло почти в два раза. За 200 лет глобальное потребление энергии возросло почти в 30 раз и составило 13 Гт у. т. (тонна условного топлива (у. т.) равна 29,3 ГДж). Уровень жизни населения всех стран определяется обеспеченностью энергией, хотя обеспеченность энергией может сильно различаться, например, из-за климатических условий. Душевое потребление энергии является важнейшим показателем, характеризующим не только уровень благосостояния жителей страны, но и ее этап экономического развития. В наиболее богатых странах на душу населения приходится в год 10–14 т у. т. (США, Канада, Норвегия), в наиболее бедных — 0,3–0,4 т у. т. (Мали, Чад, Бангладеш). Абсолютные цифры душевого потребления топлива не дают представления о том, как топливо расходуется. В странах, расположенных в тяжелых климатических условиях, имеющих значительную

Таблица 21.1. Энергетика сильных возмущений в геосферах [40]

Энергетические характеристики Земли

Гравитационная энергия Земли	$2,5 \cdot 10^{32}$ Дж
Энергия вращения Земли	$2,1 \cdot 10^{29}$ Дж
Средняя мощность процесса, связанного с изменением скорости вращения Земли	$(1,6-9) \cdot 10^{11}$ Вт
Энергия, выделяемая в ядре за счет гравитационной конвекции	$5 \cdot 10^{28}$ Дж
Мощность, выделяемая в ядре за счет вращающего момента, создаваемого Луной	10^7 Вт
Мощность, выделяемая в ядре за счет гравитационной конвекции	$3,6 \cdot 10^{11}$ Вт
Мощность теплового потока Земли через земную поверхность	$(3-4) \cdot 10^{13}$ Вт
Мощность приливного воздействия Луны	10^{13} Вт

Энергетические характеристики земных процессов

Землетрясения (магнитуда 4,0-8,5)	$6,3 \cdot 10^{10}$ $3,6 \cdot 10^{17}$ Дж

Вулканические извержения:

энергия извержений	10^{15} 10^{18} Дж
полная энергия извержения вулкана Кракатау	$2,1 \cdot 10^{19}$ Дж
Обрушения склонов, лавины	10^6 10^{10} Дж

Энергия ударов космических тел:

< 50 м (разрушающихся в верхней атмосфере)	$< 3,8 \cdot 10^{16}$ Дж
50-300 м (Тунгусский метеорит)	$(4,8-840) \cdot 10^{16}$ Дж
> 1,5 км	$8,4 \cdot 10^{20}$ Дж
> 5 км	$4,2 \cdot 10^{22}$ Дж
> 10 км	$4,2 \cdot 10^{23}$ Дж

Продолжение таблицы см. на следующей странице

Продолжение табл. 21.1

Обрушения при карстообразовании	10^8 – $8 \cdot 10^{10}$ Дж
Подводные оползни (турбидитные потоки)	до 10^{17} – 10^{19} Дж
Смерчи, торнадо, ураганы, циклоны и т. д.	10^7 – 10^{17} Дж
Средняя мощность циклонических процессов в атмосфере	109 Вт

Энергетические характеристики земной магнитосферы

Энергия магнитосферы	$1,6 \cdot 10^{18}$ Дж
Энергия внутреннего магнитного поля (тороидальное поле)	$(2 \text{ } 20) \cdot 10^{21}$ Дж
Мощность электромагнитного излучения Солнца, падающего на поверхность Земли	$2 \cdot 10^{17}$ Вт

Энергетические характеристики источников техногенного происхождения

Энергия, потребляемая человечеством за сутки	10^{18} Дж
Запас энергии крупных гидроузлов (100-метровая плотина объемом около 10^{10} м^3)	10^{15} Дж
Аварии ракет при запусках ракет типа Дискавери	10^7 Дж
Обрушения выработанных пространств	до 10^6 Дж
Взрывы топливопроводов	10^9 – 10^{11} Дж
Ядерные взрывы	10^{12} – $2,4 \cdot 10^{17}$ Дж
Энергия, выделяющаяся при крупных пожарах на нефтегазовых месторождениях	10^{14} Дж

протяженность, большая часть топлива используется просто на обогрев и транспорт. Например, в Исландии, где среднегодовая температура воздуха равна 1°C , среднедушевое потребление топлива равно почти 9 т у. т. На Мальте среднегодовая температура воздуха составляет $18,5^{\circ}\text{C}$, а среднедушевое потребление топлива равно 2,5 т у. т. в год. В постиндустриальную фазу развития государств оптимальное энергопотребление на душу населения оказывается линейно зависящим от среднегодовой температуры воздуха.

Для российской экономики характерна высокая энергоемкость национального продукта. Климатические условия большей части России являются значительно более суровыми, чем таких северных стран, как Финляндия, Норвегия, Канада, Исландия. Среднегодовая температура в Москве равна $3,8^{\circ}\text{C}$, а в Бергене (Норвегия) — $7,8^{\circ}\text{C}$. Если размер государства превосходит «критическую» величину в 500 тыс. км², то на этапе постиндустриального развития энергетическое потребление растет при увеличении территории. Это объясняет тот факт, что США (11 т у. т. в год) превосходит по душевому энергопотреблению Японию (4,5 т у. т. в год) примерно в два раза, хотя среднегодовая температура в эти странах одинакова — $11,2^{\circ}\text{C}$.

Наряду с ростом энергопотребления имеют место четкий рост стоимости производства энергии и рост загрязнений и отрицательного воздействия на окружающую среду. Причем в последние годы выявлена тенденция влияния загрязнений, образующихся в процессе выработки энергии, на природные процессы в глобальном масштабе — это, прежде всего, влияние энергетики на глобальное потепление. Топливо-энергетический комплекс РФ является главным поставщиком загрязнений в окружающую среду. На долю топливо-энергетического комплекса приходится 50% выбросов вредных веществ в атмосферу, 27% загрязнений водосмывом, 30% твердых отходов.

Основные формы влияния энергетики на окружающую среду состоят в следующем.

1. Основной объем энергии человечество пока получает за счет использования невозобновимых ресурсов.
2. Загрязнение атмосферы: тепловой эффект, выделение в атмосферу газов и пыли. Причем имеет место глобальное воздействие (парниковый эффект, разрушение озонового слоя).

3. Загрязнение гидросферы: тепловое загрязнение водоемов, выбросы загрязняющих веществ, изменение режима подземных и поверхностных вод.
4. Загрязнение литосферы при транспортировке энергоносителей и захоронении отходов, при производстве энергии.
5. Загрязнение радиоактивными и токсичными отходами окружающей среды.
6. Изменение гидрологического режима рек гидроэлектростанциями и, как следствие, загрязнение на территории водотока.
7. Создание электромагнитных полей вокруг линий электропередач.
8. Изменяется видовое разнообразие в районах размещения объектов топливно-энергетического комплекса.
9. Инициирование геологических процессов.

Топливо-энергетический комплекс поставляет в огромных количествах в окружающую среду оксид углерода, сернистый ангидрид, оксиды азота, углеводороды, сажу, тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы, хлориды, сульфаты и др.

Как добиться того, чтобы постоянный рост энергопотребления не сопровождался ростом отрицательных последствий энергетики, учитывая, что в ближайшее время человечество ощутит ограниченность ископаемого топлива? В качестве путей решения проблемы можно указать следующие.

1. Экономия энергии. Степень влияния прогресса на экономию энергии можно продемонстрировать на примере паровых машин. Как известно, КПД паровых машин 100 лет назад составлял 3–5%, а сейчас достигает 40%. Развитие мировой экономики после энергетического кризиса 70-х годов также показало, что на этом пути у человечества есть значительные резервы. В период с 1975 по 1985 г. энергоемкость валового национального продукта США снизилась на 71%, Франции — на 70%, Японии — на 78%. Однако общее потребление энергии продолжало расти. Применение ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий обеспечило значительное сокращение потребления топлива и материалов в развитых странах.

2. Развитие экологически более чистых видов производства энергии.

Решить проблему, вероятно, способно развитие альтернативных видов энергетики, таких как солнечная и геотермальная энергетика, ветровая энергетика, использование энергии океанов и других видов энергии. По принятой терминологии все виды энергии, в основе которой лежит солнечная энергия, называются возобновимыми источниками энергии. В Европе 6% энергии от ее общего потребления производится на основе использования биомассы и гидроэнергии.

Основные технологии, использующие возобновляемые источники энергии, приведены в табл. 21.2.

Приведенный в таблице перечень достаточно широк, его рассмотрение показывает, что в перспективе возобновимые виды получения энергии могут потеснить методы получения энергии, основанные на ископаемых видах топлива. В большинстве стран мира запасы возобновимых видов энергии намного превышают запасы невозобновимых видов энергии. Например, в США оценки запасов общего объема энергии возобновимых видов составляют около 600 000 млрд баррелей нефтяного эквивалента, а оценки запасов общего объема энергии невозобновимых видов составляют около 45 000 млрд баррелей нефтяного эквивалента. Более реальные оценки, проведенные с учетом ограничений, накладываемых на использование геотермальной и ветровой энергетики, уменьшают это превосходство запасов возобновимых видов энергии, но перспективность запасов сохраняется.

Пока возобновимые источники дают не более 20% общемирового потребления энергии. Основной вклад в эти 20% дают использование биомассы и гидроэнергетика. По мере совершенствования технологий возрастает вклад солнечной и ветровой энергетики. При определении перспектив развития того или иного вида энергетики встает вопрос об оценке экологического риска. Под экологическим риском подразумевается вероятность неблагоприятных для человека и биоты последствий загрязнений среды. Экологический риск включает экономические, экологические, биологические, социальные, токсикологические аспекты.

Основная часть электроэнергии производится в настоящее время на тепловых электростанциях (ТЭС). В 1989 г. в СССР на ТЭС было произведено 65%, на ГЭС — 24%, на АЭС — 11% [120]. В 1997 г. в России доля разных источников в производство электроэнергии была следующей: природный газ — 41,7%;

Таблица 21.2. Основные технологии, использующие возобновляемые источники энергии [31]

Технологии и типичный размер систем	Область применения
Фотопреобразование энергии с использованием гелиотехники. Гелиоконцентраторы с тепловой мощностью от 1 до 500 кВт. Плоские гелиоконцентраторы. Гелиоконцентраторы на вакуумных трубках. Системы сезонного накопления	Нагрев воды, отопление и охлаждение помещений. Получение тепла для промышленных и сельскохозяйственных целей
Пассивные гелиоустановки с тепловой мощностью от 1 до 500 кВт	Освещение, отопление и охлаждение помещений
Тепловые гелиоустановки мощностью от 4 кВт до 100 МВт. Гелиоконцентраторы с вогнутыми параболическими отражателями. Гелиоконцентраторы с составными параболическими отражателями. Гелиоконцентраторы с фокусирующими линзами	Получение тепла и электроэнергии для промышленных и сельскохозяйственных целей
Фотоэлектрические гелиоустановки с мощностью от Вт до МВт (солнечные батареи). Плоские коллекторы, гелиоконцентраторы	Дистанционное питание, коммунальное электроснабжение
Фотопреобразование энергии с использованием биомассы (тепловая мощность от кВт до сотен МВт). Прямое сгорание. Анаэробное разложение. Пиролиз, газификация топлива	Тепловая энергия. Жидкие и газообразные топлива
Ветроэнергетические установки с мощностью от 100 Вт до МВт. Турбины с вертикальной или горизонтальной осью	Тепло и электроэнергия
Геотермальные станции мощностью от десятков кВт до десятков МВт. Термальные воды. Сухие породы. Магма	Тепло и электроэнергия
Гидроэлектростанции мощностью от десятков Вт до тысяч МВт. Плотины ГЭС	Промышленное и коммунальное электроснабжение
Электростанции, использующие энергию океана. Волновые энергоустановки мощностью от Вт до 500 кВт. Приливные станции мощностью до МВт. Преобразование тепловой энергии океана.	Коммунальное и промышленное энергоснабжение

гидроэнергетика — 19,7%; уголь — 18,8%; атомные электростанции — 12,9%; нефть — 5,7%; прочие источники — 1,2%. В большинстве стран мира доля электроэнергии, вырабатываемой на ТЭС, больше 50%.

В качестве топлива на ТЭС обычно используют уголь, мазут, газ, сланцы. Сжигаемое органическое топливо превращается в отходы, причем масса продуктов сгорания в несколько раз превышает массу исходного топлива за счет присоединения кислорода и азота. Ископаемое топливо относится к невозобновимым ресурсам. Согласно многим оценкам угля на планете хватит на 100–300 лет, нефти — на 40–80 лет, природного газа — на 50–120 лет.

Коэффициент полезного действия ТЭС составляет в среднем 36–39%. Наряду с топливом ТЭС потребляет значительное количество воды. Типичная ТЭС мощностью 2 млн кВт ежедневно потребляет 18 000 т угля, 2 500 т мазута, 150 000 м³ воды. На охлаждение отработанного пара на ТЭС используются ежедневно 7 млн м³ воды, что приводит к тепловому загрязнению водоема-охладителя. За год работы такая ТЭС выбрасывает в атмосферу около 43 тыс. т золы, 220 тыс. т SO₂, 40 тыс. т оксидов азота.

При производстве электроэнергии и тепловой энергии в окружающей среде рассеивается в виде горящих газов и теплой воды до 60% исходной энергии. При этом для охлаждения циркуляционных вод станций нужны водохранилища большой площади, например для станции мощностью 1 ГВт требуется водоем площадью не менее 20 км². Обычно водоемы используются не только для охлаждения, но и для водоснабжения, рекреации, рыбного и сельского хозяйства. Тепловое действие затрудняет использование водоемов для задач перечисленных отраслей. Основным показателем, который определяет интенсивность тепловых сбросов, является тепловая нагрузка. По нормативам на 1 кВт установленной мощности отводится 4–6 м² водной площади. В естественных водоемах температура воды меняется в течение года, соответственно меняется и температура воды, поступающей в водоем. Например, в водосбросном канале Ленинградской АЭС температура меняется от 10–12 °С зимой и до 30–35 °С летом. Поступление больших масс теплой воды в водоем формирует вертикальную стратификацию, обширную зону прогрева, форма и размер которой меняются в зависимости от времени года, изменяет режим ледостава и продолжительность биологического вегетационного режима. В подогреваемом водоеме при наличии биогенов развитие фитопланктона увеличивается

в десятки раз. В конечном счете, изменяется видовая структура экосистемы водоема — развитие сине-зеленых водорослей, изменение численности и видового состава планктона и рыбы. Например, в заполярном озере Имаддра, которое используется для охлаждения вод с Кольской АЭС, исчез холодолюбивый голец, но появилась теплолюбивая радужная форель. Известно много случаев, когда в водоемах охладителях средней полосы хорошо акклиматизируются рыбы теплолюбивых видов. Например, в водоеме-охладителе Березовской ТЭС акклиматизировались такие теплолюбивые виды, как пестрый толстолобик, буффало, а в водоеме охладителе Шахтинской ТЭС акклиматизировалась африканская рыба тилapia. Иногда растительные теплолюбивые виды «помогают» вести борьбу с зарастанием водоемов.

Испарительные градирни башенного типа, широко используемые на тепловых и атомных станциях, как оказалось, являются мощными источниками инфразвуковых шумов с частотами менее 10 Гц. Излученные градирней инфразвуковые шумы слабо затухают и распространяются по акустическому каналу, сформированному тепловым факелом градирни, на значительные расстояния. В этом состоит еще одно отрицательное воздействие ТЭС и АЭС на окружающую среду. Жители, попавшие в зону инфразвукового воздействия, могут испытывать изменения артериального давления и частоты сердечной деятельности.

Для тепловых электростанций характерно высокое радиационное и токсичное загрязнение окружающей среды. Это обусловлено тем, что обычный уголь, его зола содержат микропримеси урана и ряда токсичных элементов (кадмий, кобальт, мышьяк и др.) в больших концентрациях, чем земная кора. При работе ТЭС радионуклиды и токсичные элементы поступают в атмосферу, почву, водоемы. Как следствие, радиационное загрязнение и загрязнение токсичными элементами вокруг ТЭС, работающей на угле, выше фоновое загрязнение в среднем в 10–100 раз.

Значительные территории вокруг ТЭС подвергаются действию кислотных дождей, золы, содержащей токсичные примеси. В зонах размещения ТЭС наблюдается хроническое угнетение растительности. Как следствие имеет место сокращение сельхозпродукции, накопление токсичных элементов в растениях.

В РФ тепловые электростанции дают 90–95% общего поступления выбросов в атмосферу от объектов энергетики твердых и жидких загрязнений, сернистого ангидрида, оксида азота. Наземные и водные экосистемы загрязняются, в основном, тепловыми электростанциями.

При строительстве крупных тепловых станций или их комплексов загрязнение окружающей среды еще более значительно. При этом могут возникать новые эффекты, например, обусловленные превышением скорости сжигания кислорода над скоростью его образования за счет фотосинтеза земных растений на данной территории или вызванные увеличением концентрации углекислого газа в приземном слое.

Из ископаемых источников топлива наиболее перспективным является уголь — это обусловлено тем, что его запасы огромны по сравнению с запасами нефти и газа. Главнейшие мировые запасы угля сосредоточены в России, Китае и США. В настоящее время основное количество энергии вырабатывается на ТЭС за счет использования нефтепродуктов. Таким образом, структура запасов ископаемого топлива не соответствует структуре его современного использования для производства энергии. В перспективе переход на новую структуру потребления ископаемого топлива вызовет значительные экологические проблемы, материальные затраты и крупные изменения во всей промышленности. Ряд развитых стран мира уже начал структурную перестройку энергетики. Например, для концепции развития производства электроэнергии США характерно увеличение вклада угля при сокращении вклада газа и нефти.

Основные достоинства гидроэлектростанций — низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии, быстрая окупаемость (себестоимость примерно в 4 раза ниже, а окупаемость в 3–4 раза быстрее, чем на тепловых электростанциях), высокая маневренность, что очень важно в периоды пиковых нагрузок, возможность аккумуляции энергии. Даже при полном использовании потенциала всех рек Земли можно обеспечить не более четверти современных энергетических потребностей человечества. В России пока используется менее 20% гидроэнергетического потенциала. Однако более полное использование гидроэнергетического потенциала РФ связано со значительными экономическими затратами, так как реки, перспективные для использования, расположены в труднодоступных регионах. В развитых странах эффективность использования гидроресурсов в 2–3 раза выше, чем в России, так что здесь у России есть определенные резервы.

Сооружение ГЭС на равнинных реках приводит ко многим экологическим проблемам. Водохранилища, необходимые для обеспечения равномерной работы ГЭС, вызывают изменения климата на прилегающих территориях на расстояниях до сотен километров, являются естественными накопителями загрязнений, в том числе радиоактивных. Если реализовать некоторые

проекты ликвидации водохранилищ, то возникнет не менее сложная задача утилизации загрязнений, которые были накоплены в водохранилищах за длительное время. В водохранилищах развиваются сине-зеленые водоросли, ускоряются процессы эвтрофикации, что приводит к ухудшению качества воды, нарушается функционирование экосистем. При строительстве водохранилищ нарушаются естественные нерестилища, происходит затопление плодородных земель, изменяется уровень подземных вод. Более перспективным является сооружение ГЭС на горных реках. Это обусловлено более высоким гидроэнергетическим потенциалом горных рек по сравнению с равнинными реками. При сооружении водохранилищ в горных районах не изымаются из землепользования большие площади плодородных земель. Гидроэлектростанции малой и средней мощности не получили широкого распространения, так как удельные капиталовложения в них гораздо выше, чем в ТЭС и крупные ГЭС и АЭС. Однако в последнее время, в связи с возникшими трудностями с завозом топлива в районы Крайнего Севера и другие труднодоступные регионы, возобновился интерес к строительству гидроэлектростанций малой и средней мощности. В рамках федеральной целевой программы «Топливо и энергия», подпрограммы «Энергообеспечение районов Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, а также мест проживания малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока за счет использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и местных видов топлива» начато строительство гидроэлектростанций мощностью от десятков Вт до десятков МВт. Десятки гидроэлектростанций малой мощности сооружены в последние пять лет на Сахалине, Камчатке, Крайнем Севере, Алтае, в ряде района Урала.

В ряде развитых стран высока доля электроэнергии, вырабатываемой на атомных электростанциях (АЭС). Так во Франции доля энергии, вырабатываемой на атомных электростанциях, достигает 77% в энергообеспечении страны, в ФРГ — 34%. АЭС не вырабатывают углекислого газа, объем других загрязнений атмосферы и земель по сравнению с ТЭС также мал. При нормальном режиме работы АЭС радиоактивное загрязнение в районах станций мало по сравнению с естественным фоном и не оказывает заметного влияния на дозы облучения населения и биоты. Количество радиоактивных веществ, образующихся в период эксплуатации АЭС, сравнительно невелико. Радиологическое воздействие отходов может проявиться спустя длительное время и на ограниченной территории. В этом заключается

важное преимущество АЭС перед тепловыми станциями, токсическое воздействие отходов которых проявляется сразу и на больших пространствах. В течение длительного времени АЭС представлялись как наиболее экологически чистый вид электростанций и как перспективная замена ТЭС, оказывающих влияние на глобальное потепление. Однако процесс безопасной эксплуатации АЭС еще не решен, не решена проблема захоронения радиоактивных отходов, например, долгоживущего C^{14} (период полураспада составляет 5760 лет, и поэтому он может накапливаться в биосфере). Углерод является основой всех органических соединений, входит в состав молекул белков, ДНК. Входя в молекулы органических соединений, C^{14} является внутренним облучателем.

С другой стороны, замена основной массы ТЭС на АЭС для устранения их вклада в загрязнение атмосферы в масштабе планеты не осуществима из-за огромных экономических затрат.

За период существования ядерной энергетики произошло три крупных радиационных аварии: в 1957 г. в Великобритании (Уиндский), в 1979 г. в США (Три-Майл-Айленд), в 1986 г. на Чернобыльской АЭС. По площади загрязнения и величине выброшенной активности Чернобыльская авария является наиболее тяжелой. В результате аварии радиоактивному загрязнению подверглась территория не только СССР, но и других стран Европы, пострадавшим регионам нанесен значительный экономический ущерб. Чернобыльская катастрофа привела к коренному изменению отношения населения к АЭС, прежде всего в регионах размещения станций или их возможного строительства. В ряде стран возникла проблема социальной приемственности ядерной энергетики. Психологический стресс, связанный с проживанием на загрязненных территориях, переселением пострадавшего населения, сохранится в течение длительного времени. Поэтому перспектива развития атомной энергетики в ближайшие годы неясна.

Ограниченные возможности атомной энергетики и гидроэнергетики, ограниченность запасов ископаемого топлива (и в перспективе — исчерпание), необходимого для работы тепловых электростанций, их мощное тепловое воздействие на атмосферу заставляют более внимательно рассмотреть нетрадиционные источники получения энергии.

Некоторые страны уже достигли значительных успехов в области использования нетрадиционных методов получения энергии. Например, Индия занимает 3-е место в мире по суммарной

мощности ветровых электростанций. В районах Гималаев широко развернуто строительство малых ГЭС, суммарная мощность которых уже превысила 160 МВт. В деревенских общинах Индии строятся биогазовые установки, солнечные плиты, применение которых значительно сокращает поступление продуктов сгорания в атмосферу. Ветро двигатели на трех перевалах в Калифорнии (Алтамонт, Техачали, Сан-Горгонио) имеют суммарную мощность 1500 МВт. Ветровые установки Дании дают более 5% всей вырабатываемой в стране энергии, причем стоимость электроэнергии, полученной на ветроэнергетических установках, уже ниже стоимости энергии, полученной на АЭС и ТЭС.

В России реализуется комплексная программа освоения нетрадиционных источников энергии. Программа была разработана на 1991–2005 гг., она предусматривала доведение доли нетрадиционных источников энергии к 2000 г. до 0,8% объема внутреннего энергопотребления. Государственная научно-техническая программа «Экологически чистая энергетика» определяет направление и темпы развития фотоэлектрических преобразователей. Конкретные вопросы развития нетрадиционных видов энергетики решаются в рамках федеральной целевой программы «Топливо и энергия», подпрограммы «Энергообеспечение районов Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, а также мест проживания малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока за счет использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии и местных видов топлива». В России около 45% жилищ отапливается печами. В настоящее время в РФ около 70% территории с населением 10 млн человек относится к зоне децентрализованного энергоснабжения. Выработка электроэнергии в таких регионах производится, в основном, на бензиновых и дизельных генераторах малой мощности. Резкий рост стоимости привозного органического топлива делает удаленные районы Крайнего Севера и Дальнего Востока РФ перспективными для развития нетрадиционных источников энергии.

Солнечная энергетика

Мощность солнечной радиации, поглощенной атмосферой и земной поверхностью, составляет 10^5 ТВт (10^{17} Вт). Эта величина кажется огромной по сравнению с современным мировым энергопотреблением, равным 10 ТВт. Велики и другие потоки энергии у поверхности Земли. Так перенос тепла атмосферой

от экватора к полюсам составляет $3 \cdot 10^3$ ТВт, а океаном — $2 \cdot 10^3$ ТВт, мощность оксанских волн — 10^3 ТВт, ветровая мощность — $2 \cdot 10^3$ ТВт, мощность приливов — 1 ТВт, мощность фотосинтеза — 10^2 ТВт. Первоисточником этих энергетических потоков, как и ископаемого топлива, является солнечная радиация. Наиболее перспективным видом нетрадиционной энергетики является солнечная энергетика. Согласно многочисленным экономическим прогнозам доля солнечной энергетики в различных ее формах будет дальше непрерывно возрастать. Широкому внедрению солнечной энергетики пока препятствует более высокая стоимость производства на солнечных электростанциях по сравнению с традиционными источниками энергии. Важным показателем перспективности солнечной энергетики является то, что стоимость производства энергии на солнечных электростанциях различных типов непрерывно снижается (оставаясь пока более высокой по сравнению с источниками традиционного типа), а на станциях традиционных типов растет, что связано с ростом стоимости добычи и транспортировки ископаемого топлива.

Солнечная энергетика имеет особенности, которые затрудняют ее широкое использование. Это, прежде всего, низкая плотность потока энергии и ее изменчивость, так как интенсивность солнечного излучения зависит от времени года, суток и метеословий. При эксплуатации фотоэлектрических преобразователей возникают экологические проблемы, обусловленные большими размерами установок и использованием при производстве, эксплуатации, утилизации фотоэлектрических преобразователей ряда вредных веществ. Поэтому в ряде стран, использующих фотоэлектрические преобразователи для производства энергии, существуют особые требования, определяющие правила работы с установками фотоэлектрических преобразователей.

К основным методам преобразования солнечной энергии относятся фотоэлектрическое преобразование, термодинамический цикл, биоконверсия. Кратко, следуя [6, 31, 108], рассмотрим методы получения солнечной энергии.

Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии

Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии основан на особенностях взаимодействия полупроводниковых материалов со световым излучением. В фотоэлектрическом преобразователе свободные носители образуются в результате поглощения светового кванта полупроводником, разделение зарядов производится под действием электрического поля, возникающего внутри полупроводника. Фотоэлектрический

преобразователь представляет собой полупроводниковый диод большой площади. Эффективность поглощения света зависит от материала и толщины элемента. Например, аморфный кремний поглощает в 50 раз эффективнее, чем кристаллический. Эффективность работы полупроводниковых преобразователей сильно зависит от чистоты материала. Чистота кремния должна составлять 99,99%, для обеспечения ее необходимы сложная технология и значительные затраты. Эффективность работы преобразователя также зависит от спектральной чувствительности материала. Элементы на кристаллическом кремнии обладают чувствительностью в ультрафиолетовой части, видимой и в ближней инфракрасной областях солнечного спектра. Теоретически КПД преобразователя на кристаллическом кремнии достигает 28%.

Как уже говорилось, низкая плотность солнечного излучения является одним из препятствий его широкого использования. Для устранения этого недостатка при конструировании фотоэлектрических преобразователей используются различного рода концентраторы излучения. Для компенсации периодичности поступления солнечной энергии фотоэлектрические системы целесообразно включать в гибридные станции. На таких станциях в период плохих погодных условий выработка энергии может проводиться за счет традиционных систем. Главные преимущества фотоэлектрических установок заключаются в следующем. Они не имеют движущихся частей, их конструкция очень проста, производство технологично. Солнечные батареи собираются из однотипных модулей. Важным преимуществом фотоэлектрических преобразователей является устойчивая тенденция снижения их стоимости. В начале 90-х гг. в мире существовало около 20 крупных солнечных электростанций мощностью до 7 МВт, использующих фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии.

К недостаткам фотоэлектрических преобразователей можно отнести разрушение полупроводникового материала от времени, зависимость эффективности работы системы от ее запыленности, необходимость разработки сложных методов очистки батарей от загрязнения. Все это ограничивает срок службы фотоэлектрических преобразователей.

Гибридные станции, состоящие из фотоэлектрических преобразователей и дизельных генераторов, уже широко используются для электроснабжения на территориях, где нет распределительных электрических сетей. Например, система такого типа обеспечивает электроэнергией жителей Кокосового острова, расположенного в Торресовом проливе.

Термодинамические преобразователи

Энергию получают из солнечной энергии методом термодинамического преобразования практически так же, как из других источников. Однако такие особенности солнечного излучения, как низкая мощность, суточная и сезонная изменчивость, зависимость от погодных условий, накладывают определенные ограничения на конструкцию термодинамических преобразователей.

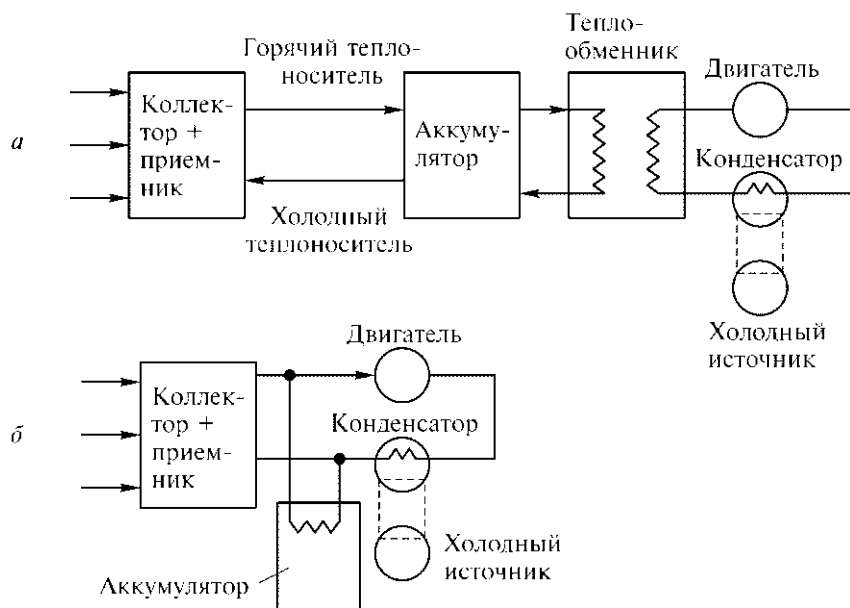


Рис. 21.1. Схема термодинамического преобразователя солнечной энергии: а — схема с теплообменником, б — схема без теплообменника [6]

Обычный термодинамический преобразователь солнечной энергии содержит следующие части (рис. 21.1):

- система улавливания солнечной радиации, которая предназначена частично скомпенсировать низкую плотность солнечного излучения;
- присная система, которая преобразует солнечную энергию в энергию теплоносителя;
- система переноса теплоносителя от приемника к аккумулятору или к теплообменнику;

- тепловой аккумулятор, который обеспечивает смягчение зависимости от суточной изменчивости и погодных условий;
- теплообменники, образующие нагревательный и охлаждающий источники тепловой машины.

Системы улавливания солнечной радиации, в зависимости от конструкции, обеспечивают разные степени концентрации. Малая степень концентрации (до 100) получается при использовании, например, параболических отражателей, ось которых перпендикулярна плоскости движения Солнца. Средняя степень концентрации (до 1000) может быть обеспечена применением фокусирующих гелиостатов, управляемых по двум степеням свободы. Примером такого гелиостата является зеркало в форме параболоида вращения, ось которого ориентируется на Солнце. Высокая степень концентрации (более 1000) осуществляется оптической системой, состоящей из плоских гелиостатов и параболоидного отражателя. Система аккумуляции позволяет смягчить влияние изменчивости погодных условий и суточной изменчивости. Аккумулирование может быть кратковременным для предотвращения колебаний тепловой нагрузки из-за облачности, суточным — для выработки электроэнергии в темное время суток и сезонным — для обеспечения энергией потребителей в неблагоприятные сезоны. Аккумуляция энергии, как правило, осуществляется за счет накопления тепла. Низкотемпературные системы аккумуляции (до 100°C), в частности водяные, широко применяются для отопления зданий и горячего водоснабжения. В низкотемпературных системах используются также фазовые переходы и обратимые реакции гидратации и сольватации солей и кислот. Для среднетемпературного аккумулирования (от 100 до 550°C) используются гидраты оксидов щелочно-земельных металлов. Высокотемпературное аккумулирование (температура выше 550°C) осуществляется с помощью обратимых экзоэндо-термических реакций.

Тип термодинамического цикла и рабочего тела определяется областью рабочих температур теплового двигателя.

В настоящее время идеи термодинамического преобразования реализуются в схемах двух типов: гелиостаты башенного типа и станции с распределенным приемником энергии.

На гелиостанции башенного типа энергия от каждого гелиостата передается оптическим способом. Управление гелиостатами осуществляет ЭВМ. До 80% стоимости станции составляет стоимость гелиостатов. Система сбора и передачи энергии в

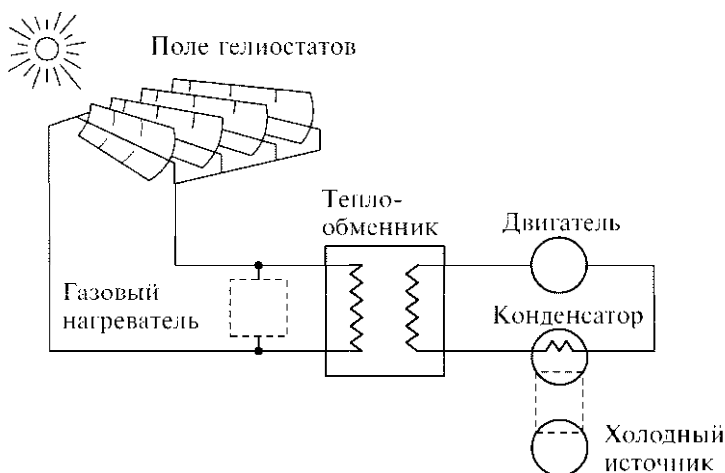


Рис. 21.2. Схема солнечной станции с параболлическими концентраторами [6]

установках башенного типа оказывается очень дорогой. Поэтому такие установки не получили широкого распространения. В Мексике, США работают установки такого типа мощностью 10 МВт.

Станции с распределенными приемниками солнечной энергии оказались более перспективными. Концентраторы параболлического типа, вращающиеся вокруг оси, передают энергию трубчатым приемникам, находящимся на фокальной линии (рис. 21.2). В качестве теплоносителя обычно используется масло. Наибольших успехов в строительстве станций такого типа добилась фирма «Луз», которой сооружено более десятка станций мощностью до 80 МВт. Станции этой фирмой строятся на гибридном принципе — компенсация изменчивости поступления солнечной радиации достигается использованием природного газа. На новейших установка «Луз» себестоимость электроэнергии уже равна ее себестоимости на атомных станциях. Нерешенной проблемой в гелиостанциях является вопрос о длительном хранении электроэнергии. Правда, следует отметить, что этот вопрос не решен не только в солнечной энергетике, но и вообще в энергетике.

Развитие солнечной энергетики сдерживают присущие ей недостатки, из которых главными являются низкая плотность солнечной радиации, нерегулярный характер ее поступления, большие площади солнечных станций. Решить эти проблемы можно, отказавшись от наземных солнечных станций, размещая

солнечные станции на околоземной орбите. Конструкторы предполагают разместить на геосинхронной орбите солнечные батареи большой мощности. Размещение станции на геосинхронной орбите обеспечивает расположение станции над определенным пунктом Земли. Энергия на земную поверхность передается в форме высокочастотного электромагнитного излучения. Плотность солнечного излучения на геосинхронной орбите оказывается выше, чем на Земле. Соответствующий выбор положения плоскости орбиты обеспечивает почти круглогодичное поступление солнечной энергии на батареи станции. Не возникает проблемы очистки панелей станции и нарушения землепользования, теплового загрязнения.

Биоконверсия солнечной энергии

Биомасса, как источник энергии, используется с древнейших времен. В процессе фотосинтеза солнечная энергия запасается в виде химической энергии в зеленой массе растений. Запасенная в биомассе энергия может быть использована в виде пищи человеком или животными или для получения энергии в быту и производстве. В настоящее время до 15% энергии в мире производится из биомассы. Из одной тонны древесных опилок современные технологии позволяют получить 700 кг жидкого топлива, а в России находится 20% лесных ресурсов планеты.

Самый древний, и еще широко применяемый, способ получения энергии из биомассы заключается в ее сжигании. В сельской местности до 85% энергии получают этим способом. Как топливо, биомасса имеет ряд преимуществ перед ископаемым топливом. При сжигании биомассы выделяется в 10–20 раз меньше серы и в 3–5 раз меньше золы, чем при сжигании угля. Количество углекислого газа, выделившегося при сжигании биомассы, равно количеству углекислого газа, затраченного в процессе фотосинтеза. Таким образом обеспечивается нулевой баланс эмиссии оксида углерода.

Энергию биомассы можно получать из специальных сельскохозяйственных культур. Например, в субтропическом поясе России предлагается выращивать карликовые породы быстрорастущего вида папайи. С одного гектара за 6 месяцев на опытных участках получают более 5 т биомассы по сухому весу, которую можно использовать для получения биогаза. Биомассу можно также использовать для получения биологически активных пищевых и кормовых добавок. К перспективным видам относятся быстрорастущие деревья, растения, богатые углеводами, которые применяются для получения этилового спирта.

Для производства этилового спирта наиболее широко используется сахарный тростник. В Бразилии чистый этанол и смесь этанола с бензином являются широко распространенным видом топлива. Такое биотопливо легко хранить и транспортировать, оно обладает высокой теплотворной способностью, более полно сгорает в двигателе. При сгорании такого топлива атмосфера загрязняется гораздо меньше, чем при сжигании обычного топлива. Бразилия, приступившая к использованию этанола в качестве автомобильного топлива в 70-е гг., обладает лучшей в мире технологией его производства. К числу перспективных методов биоконверсии относится способ получения моторного топлива (метилового эфира) из семян рапса. Моторное топливо на основе рапса, обладая характеристиками, близкими к дизельному топливу, практически не дает выбросов вредных веществ. В Чехии производится около 1 млн т биодизельного топлива в год. В США разработан способ производства спирта из кукурузы, в Италии ведутся работы над разработкой способа рентабельного производства спирта из сорго. Около 200 автобусов в Стокгольме уже работают на спирте.

Широко распространенный способ получения энергии из биомассы заключается в получении биогаза путем анаэробного пересбраживания. Такой газ содержит около 70% метана. Биометаногенез был открыт еще в 1776 г. Вольгой, который обнаружил метан в болотном газе. Биогаз позволяет использовать газовые турбины, являющиеся самыми современными средствами теплоэнергетики. Для производства биогаза используются органические отходы сельского хозяйства и промышленности. Это направление является одним из перспективных и многообещающих способов решения проблемы энергообеспечения сельских районов. Например, из 300 т сухого вещества навоза, превращенного в биогаз, выход энергии составляет около 30 т нефтяного эквивалента. Более перспективным является термохимическое преобразование биомассы, в котором синтетический газ получается в процессе сжигания биомассы при температуре 800–15 000 °С. Газотурбинные электростанции с установками газификации имеют КПД 40–45%.

В Индии, Китае эксплуатируются несколько десятков миллионов установок для производства биогаза в сельской местности.

Биомассу для последующего получения биогаза можно выращивать в водной среде, культивируя водоросли и микроводоросли.

Микроводоросли спирулины для получения пищи использовались еще в Средние века индейцами. Микроводоросль спирулина, содержащая до 70% белка, 19% углеводов, является ценным питательным продуктом. В настоящее время во многих странах мира широко практикуется выращивание микроводорослей для изготовления пищевых добавок. Хорошо известный в нашей стране препарат «Сплат» является типичным образцом такой продукции. С начала 50-х гг. проводятся исследования по культивированию микроводорослей для биоконверсии солнечной энергии. Некоторые виды микроводорослей продуцируют углеводороды, которые можно использовать для получения газообразного, жидкого или твердого топлива. Эта способность не кажется удивительной, если вспомнить, что человечество давно использует углеводороды, вырабатываемые из растений, таких как молочай, нефтяной орех и др.

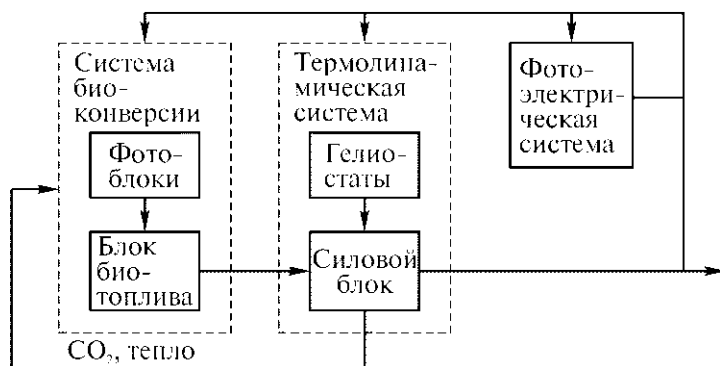


Рис. 21.3. Схема гибридной солнечной станции [6]

Интенсивно разрабатываются также схемы гибридных солнечных станций, совмещающих в себе три метода преобразования солнечной энергии — фотоэлектрический, термодинамический и биоконверсию (рис. 21.3). Фотоэлектрическая часть системы может производить энергию только в светлое время суток, используя прямую и рассеянную радиацию. Часть солнечной станции, использующая термодинамический цикл, преобразует только прямую солнечную радиацию и может обеспечить производство электроэнергии в темное время суток или при кратковременном отсутствии прямой радиации. Применение биоконверсии обеспечивает долгосрочную аккумуляцию энергии. Поэтому

гибридная солнечная станция, содержащая блок биоконверсии, способна круглогодично вырабатывать электроэнергию.

Волновая энергетика

В последнее время пристальное внимание ученых и конструкторов многих стран привлекает использование различных видов энергии Мирового океана. Построены первые приливные электростанции. Разрабатываются методы использования тепловой энергии океана, связанной, например, со значительной разницей температур поверхностного и глубинного слоев океана, достигающей в тропических областях 20°C и более. В общем энергетическом балансе Мирового океана количество механической энергии значительно меньше тепловой.

Рассмотрим некоторые способы использования одной из форм механической энергии океана — энергии морских волн [32, 46, 61, 108, 112]. Плотность потока волновой энергии равна произведению плотности волновой энергии на групповую скорость. Плотность волновой энергии пропорциональна квадрату высоты волны h :

$$E = \frac{1}{8} gh^2.$$

На глубокой воде групповая скорость поверхностных гравитационных волн

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}}.$$

В случае мелководья групповая скорость волн имеет вид

$$c = \sqrt{gH}.$$

В этих формулах H — глубина жидкости, g — ускорение свободного падения, k — волновое число, ρ — плотность воды.

Например, волна с периодом 10 с и высотой 2 м действует на 1 м берега с мощностью около 37 кВт. Волны таких размеров — явление типичное для Мирового океана. Мощные ветры, действующие над значительной частью поверхности океана, создают огромные волны. Волны высотой в 10–20 м — вот размеры волн, обычные во многих частях океана. Интенсивность ветровых систем максимальна в зимнее время, когда потребности в энергии части человечества, проживающей в Северном полушарии, резко возрастают. Полная волновая мощность океана оценивается примерно в $50 \cdot 10^{12}$ кВт. Основными недостатками, ограничивающими широкое использование волновой энергии, являются ее

сравнительно низкая плотность, сильная изменчивость во времени и высокая стоимость волновых энергетических установок.

В настоящее время накоплен значительный объем инструментальных измерений ветрового волнения в Мировом океане. На основе этих данных волновая климатология определяет районы с наиболее интенсивным и постоянным волнением. Потери волновой энергии за счет прибоя для земного шара оцениваются в $2 \cdot 10^9$ кВт. Общая длина береговой линии равна 200 000 км, т. е. в среднем на метр береговой линии приходится 10 кВт. Однако существуют районы побережья, в которых средняя волновая мощность значительно выше. Они постоянно подвергаются воздействию океанских волн, длиной 50–200 м, высотой более 2–5 м. Образование этих волн не обязательно связано с действием местных ветров. Волны, возникшие в одной части океана, способны проходить огромные расстояния в сотни и тысячи миль, так как они слабо затухают в глубоком океане. Согласно некоторым оценкам среднегодовая мощность волн, приходящаяся на каждый метр западного побережья Великобритании, достигает 80 кВт, а полная волновая мощность побережья равна 120 ГВт, что примерно в 5 раз превышает современные потребности электроэнергии в стране. На многих участках шельфовой зоны США и Японии плотность волновой энергии составляет около 40 кВт/м.

В большинстве преобразователей волновой энергии используют двухступенчатую схему преобразования, на первом этапе осуществляется передача энергии от волны к телу-поглотителю и решается задача концентрирования волновой энергии. На втором этапе поглощенная энергия преобразуется в вид, удобный для потребления. Существует три основных типа проектов по извлечению волновой энергии. В первом используется метод повышения концентрации волновой энергии и превращения ее в потенциальную энергию воды. Во втором — тело с несколькими степенями свободы находится у поверхности воды. Волновые силы, действующие на тело, передают ему часть волновой энергии. Основным недостатком такого проекта является уязвимость тела, находящегося под действием волн. В третьем типе проектов система, поглощающая волновую энергию, находится под водой. Передача волновой энергии приемному устройству происходит под действием волнового давления или скорости. Более общей классификацией волновых преобразователей является их деление на активные и пассивные. К активным типам преобразователей волновой энергии относятся преобразователи, имеющие

движущиеся или колеблющиеся части. К пассивным типам относятся устройства, которые только концентрируют волновую энергию.

В ряде волновых установок для повышения эффективности плотность волновой энергии искусственно повышается. Изменяя рельеф дна в прибрежной зоне (групповая скорость волн зависит от глубины), можно сконцентрировать морские волны. Например, если сфокусировать волны с побережья длиной в несколько километров на фронте в 500 м, то высота волны может достигнуть 30 м. Попадая в сооружения специальной конструкции, вода поднимается на высоту в 100 м. В такой установке около 70% энергии морских волн можно преобразовать в потенциальную энергию морской воды, поднятой на 100 м над уровнем океана. Энергия поднятой воды далее используется для работы гидроэлектростанции, расположенной на уровне океана. Волновая электростанция подобного типа построена для обеспечения электроэнергией острова Маврикий, не имеющего традиционных источников энергии. Электростанция мощностью 850 кВт действует в Норвегии с 1985 г.

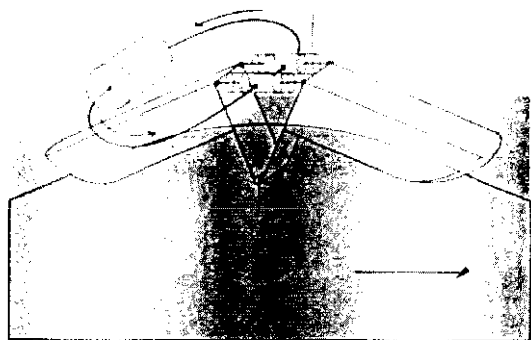


Рис. 21.4. Плот Коккереля

К устройствам второго типа можно отнести плот Коккереля, состоящий из двух или трех шарнирно-соединенных понтонов (рис. 21.4). При прохождении волны понтоны перемещаются друг относительно друга. Из-за взаимного перемещения понтонов при помощи поршней приводится в движение жидкость в гидросистеме. Жидкость уже приводит в движение гидромотор. Эффективность работы такого устройства зависит от соотношения длины

волны и длины волнопреобразователя. Эксперименты с плотом Коккереля показали его высокую эффективность, однако размещение таких конструкций в прибрежной зоне требует больших затрат.

Хорошо поглощает волновую энергию «утка Солтера». На опытных лабораторных установках достигался КПД 90%. «Утка Солтера» представляет собой поплавок конической формы, насаженный на вал и отслеживающий падающую волну. Для работы в морских условиях на длинный вал надевается несколько

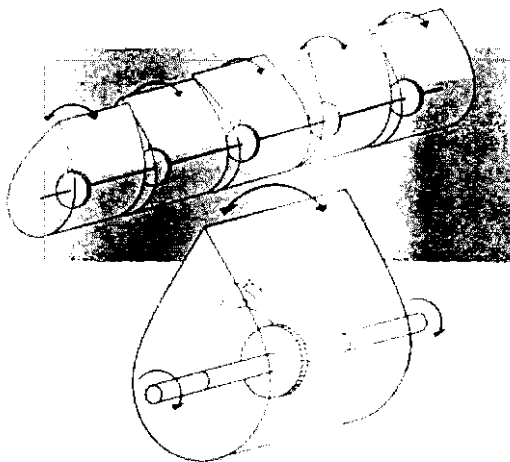


Рис. 21.5. «Утка Солтера»

поплавков (рис. 21.5). Однако при создании в натуральных условиях преобразователя типа «утки Солтера» возникают значительные инженерные сложности. Поплавок должен иметь большие размеры, система должна включать большое число поплавков, специфика конструкции приводит к сложностям на стадии преобразования механической энергии в электрическую.

Ряд устройств по преобразованию волновой энергии использует различные свойства волновых движений: периодические изменения уровня водной поверхности, волнового давления или волновой скорости. Опишем некоторые из таких устройств.

Представим себе сооружение, состоящее из ряда замкнутых камер, соединенных с морем отверстиями. Под действием волн уровень воды в камерах периодически изменяется, что вызывает поток воздуха из камер. Воздушный поток из камер можно превратить в пульсирующий по величине, но постоянный по

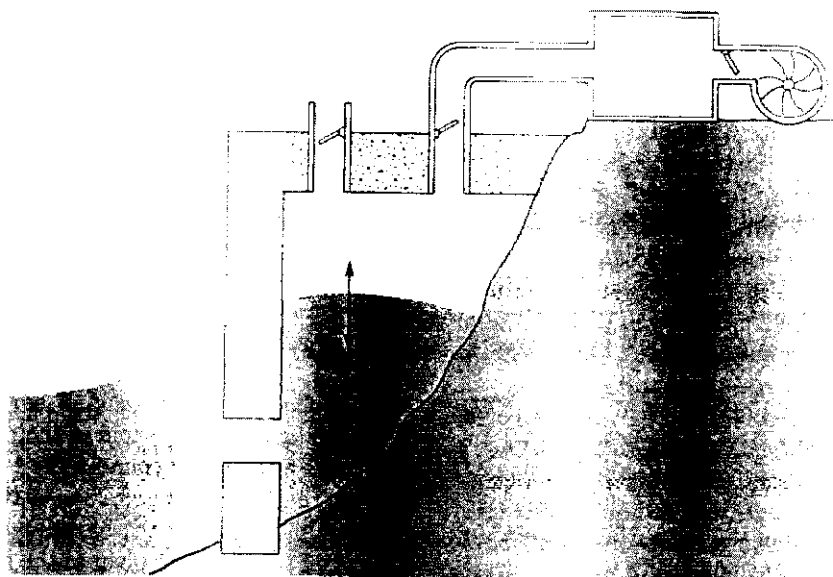


Рис. 21.6. Волновой насос, или пневматический преобразователь

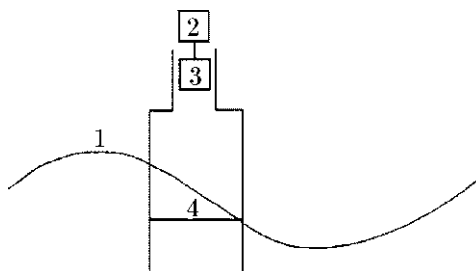


Рис. 21.7. Схема пневматического преобразователя волновой энергии: 1 — волновая поверхность, 2 — волновой генератор, 3 — поршень, 4 — волновой столб

направлению поток, приводящий в движение воздушную турбину (рис. 21.6, 21.7). Процент использования волновой энергии достигает 40%. Подобное устройство можно разместить как у берега, так и в прибрежной зоне. Электроэнергия передается на берег по кабелю. В Японии создан промышленный образец такой системы, имеющей 9 турбин общей мощностью в 2 МВт. Перед выпуском промышленного образца работа системы воздушных турбогенераторов, схемы крепления станции и методы передачи электроэнергии отрабатывались на плавучей электростанции «Каймей» мощностью 330 кВт. Работающая по такому принципу волновая установка в Японии называется «столбом Масуды» по

имени ее изобретателя. В Англии, где был предложен целый ряд усовершенствований установки, она называется осциллирующим водным столбом. Устройства подобного типа уже широко используются для энергообеспечения автономных буйковых станций.

Сила, с которой волны воздействуют на сооружения в береговой зоне, достигает нескольких тонн на квадратный метр. Это силовое воздействие тоже может быть использовано для преобразования волновой энергии. Представим себе буй с основанием в виде трапеции, закорешенный в прибрежной зоне. Широкая сторона трапеции обращена в сторону океана — это позволяет концентрировать волновую энергию. Эта сторона буя открыта для волн. Внутри буя разделен на секции, которые завершаются цилиндрами с поршнями. Волны, воздействуя на поршни, приводят в движение воздух, который в свою очередь движет воздушную турбину. При размере основания в 350 м и высоте буя в 20 м мощность составит около 100 МВт.

Преобразователи волновой энергии, в которых имеется значительное число подвижных частей, чувствительны к воздействию морской воды и нерегулярных силовых нагрузок. Поэтому предпочтение отдается системам с минимальным числом движущихся частей.

Параллельность берегу гребней волн в прибрежной зоне, обусловленная явлением рефракции, используется в следующем типе преобразователя волновой энергии. Цилиндр положительной плавучести полностью погружается в воду. Ось цилиндра параллельна гребню падающей волны. На заданной глубине цилиндр удерживается при помощи четырех тросов, обладающих нейтральной плавучестью. К концам тросов крепится пружинная нагрузка. Такая система крепления позволяет перемещаться цилиндру в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Если гребень падающей волны параллелен оси цилиндра, то цилиндр будет совершать движение, подобное тому, которое совершают частицы воды в волне. Расположение дополнительных цилиндров с другими параметрами позволяет расширить диапазон длин волн, в котором происходит эффективное поглощение волновой энергии. Полное заглубление цилиндров повышает эксплуатационную надежность системы по сравнению со схемами, в которых движущиеся части расположены на поверхности воды.

В качестве перспективных типов преобразователей волновой энергии в последнее время рассматриваются индукционно-емкостные преобразователи волновой энергии. В преобразователях такого типа одной обкладкой конденсатора является волновая

поверхность, другой обкладкой служит металлический стержень, покрытый слоем диэлектрика и помещенный в воду.

Широкая разработка и эксплуатация устройств, использующих волновую энергию, только начинаются. Наиболее интенсивные исследования ведутся в странах, обладающих большими волновыми мощностями, — в Англии, Японии, Норвегии. Состоялись первые конференции по использованию энергии волн. Проходят испытания опытные и модельные установки. Наряду с рассмотренными системами преобразователей волновой энергии существуют другие проекты, использующие тот или иной принцип.

В настоящее время производство 1 кВт электроэнергии на волновых электростанциях в 5–10 раз выше, чем на атомной или тепловой станциях. Это является главным фактором, сдерживающим развитие волновой энергетики. Волновая энергетика не использует ископаемое топливо, стоимость которого непрерывно растет, а запасы ограничены. Перед волновой энергетикой не стоит в острой форме проблема воздействия на окружающую среду. Однако если значительная часть акватории будет покрыта волновыми преобразователями, это может привести к неблагоприятным экологическим последствиям, так как волны играют важную роль в тепло-влаго-обмене атмосферы и океана, в очистке поверхности моря и придонного слоя воздушного потока от загрязнения.

Волновую энергетику пока следует рассматривать как дополнительный к традиционным источник энергии, который может иметь значение только в некоторых районах мира.

Приливные электростанции

Рассмотрим использование еще одного вида энергии океанов — энергии приливов [14, 32, 61, 108, 112]. В прибрежной зоне приливные волны проявляются в периодическом подъеме и опускании уровня. В устьях приливы часто проявляются в виде мощных течений. В некоторых местах высота прилива достигает значительной величины, так в Пенжинской губе (Охотское море) максимальная амплитуда прилива равна 12 м, а в заливе Фанди (Канада) — 19,6 м. Энергия приливных волн огромна, например, средняя мощность, переносимая приливной волной через Ла-Манш, равна 180 млн кВт. Из-за донного трения, влияния дна и берегов мощность приливной волны уменьшается на выходе из Ла-Манша до 23 млн кВт. В Мировом океане существует несколько десятков мелководных районов, в которых диссипируется приливная энергия и которые являются перспективными

для преобразования приливной энергии. Общая мощность, рассеиваемая приливами в Мировом океане, составляет 1–2 млрд кВт, причем большая часть этой энергии расходуется в мелководных морях, проливах и заливах, т. е. как раз там, где наиболее выгодно гидротехническое строительство.

Человек уже давно начал использовать энергию приливов. Приливные мельницы использовались в Англии еще в XV в., они были широко распространены на северо-восточном побережье Канады в XVIII в. Первые приливные мельницы строились по очень простой схеме. Вода во время прилива наполняла естественный или искусственный водоем. Ворота шлюза, отделяющего этот водоем от моря, закрывались в момент, когда высота прилива достигала наивысшей точки (полная вода). Когда высота прилива падала (малая вода), собранную в водоеме воду спускали через шлюз, и она вращала мельничное колесо (рис. 21.8).

Однако такие мельницы могут работать только в определенное время суток. Позднее изобретатели поставили мельничное колесо на плот, который был закреплен на якорс и поворачивался в сторону потока. Это приводило к тому, что мельничное колесо вращалось как при приливе, так и при отливе. Оба этих принципа (накопление потенциальной энергии во время прилива и использование приливного и отливного потоков) используются в современных приливных электростанциях. Для эффективной работы как в приливном, так

и в отливном потоке созданы реверсивные турбины, поворачивающие лопасти навстречу потоку. Для концентрации водного напора на станции плотина отделяет часть акватории. В теле плотины размещаются гидрогенераторы, водопропускные сооружения, здание станции. Величина напора зависит от колебаний уровня по обе стороны плотины. Колебания во внешнем бассейне

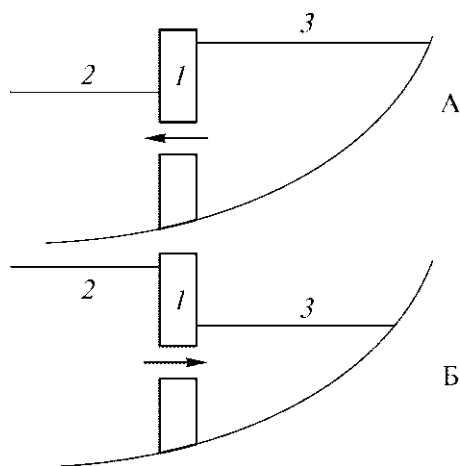


Рис. 21.8. Схема работы приливной станции: 1 — плотина, 2 — уровень воды в море, 3 — уровень воды в водоеме. А — отлив, Б — прилив

определяются местным приливом, колебания во внутреннем бассейне определяются расходами воды при работе станций. Приливные станции относятся к низконапорным гидротехническим сооружениям, в которых водяной напор имеет значение не более 15–20 м.

Первая приливная электростанция была построена в Великобритании около Ливерпуля в 1913 г. В нашей стране в 1968 г. дала ток опытная Кислогубская приливная электростанция. Станция имела два гидроагрегата по 400 кВт каждый. Несколько приливных электростанций малой мощности построено в Китае. В устье реки Ранс (Франция) с 1967 г. работает приливная электростанция мощностью 320 МВт. Высота приливов достигает 13,5 м, во время прилива вода в реке движется с высокой скоростью. Плотина шириной 0,8 км перегородила реку. Когда прилив заканчивается, задержанные плотиной водные массы спускаются в океан через турбины. Все агрегаты плотины задерживают примерно 25% приливной энергии. Использование фаз полной и малой воды для аккумулирования энергии повышает эффективность работы станции. Суть этого метода заключается в следующем. Во время полной воды, когда разница между уровнем в океане и резервуаре составляет небольшую величину, энергия какого-либо другого источника используется для перекачки воды в накопительную емкость. В момент малой воды, когда разница уровней достигает величины 8–10 м, накопленная вода используется для выработки энергии. Так же работает станция при малой воде. Длительная и успешная эксплуатация этой приливной станции показала перспективность приливных станций.

Несколько приливных станций проектируется и уже строится в заливе Фанди, который характеризуется самыми высокими приливами в мире. В настоящее время там уже построена станция мощностью 20 МВт. В заливе Фанди (бухта Майнас) начато строительство станции мощностью от 3 800 до 5 300 МВт. Эта бухта характеризуется средним приливом около 13 м. Ряд районов Мирового океана также обладает огромными ресурсами приливной энергии. Разрабатывались проекты электростанции в Мезенской губе Белого моря мощностью от 6 до 14 ГВт, Пенжинской губе Охотского моря на 35 ГВт. Использование энергии приливов ограничивается, в основном, высокой стоимостью сооружения. Например, стоимость строительства приливной электростанции на реке Ранс в 2,5 раза выше, чем стоимость обычной речной гидроэлектростанции такой же мощности.

Пока приливные электростанции сооружаются в районах с большой высотой прилива. Однако уже сейчас созданы турбины,

способные работать при высоте прилива в 1 м, что значительно расширяет районы возможного строительства. Конечно, приливные электростанции не могут заменить ядерную или речную энергетику, однако они имеют некоторые важные преимущества. Приливные электростанции более стабильны и надежны в работе, чем гидроэлектростанции; на них можно легко накапливать энергию и приспособлять ее расход к изменению спроса потребителей, что трудно делать на тепловых станциях.

Приливные станции, как оказалось, характеризуются отрицательным влиянием на окружающую среду. Сооружение плотины приводит к увеличению амплитуды прилива. Даже небольшое повышение амплитуды прилива вызовет значительное изменение распределения грунтовых вод в береговой зоне, увеличит зону затопления, нарушит циркуляцию водных масс, изменит ледовый режим в части бассейна за плотинной и т. д. Приливные течения оказывают сильное воздействие на погоду. Хорошо известно влияние приливов в районе Курильских островов на температуру поверхностного слоя воды и формирование туманов. Нарушение сложившихся режимных условий приливов изменит и погодные условия. Предусмотреть и оценить все возможные последствия, обусловленные изменением гидрологического режима, довольно сложно. Сооружение плотины вызовет и важные биологические последствия. В бассейне за плотинной работа станции будет оказывать воздействие на литораль (зона между наивысшей точкой затопления во время прилива и нижней, обнажающейся при отливе). Плотина может оказать вредное воздействие не только на местные сообщества, но и на мигрирующие виды. Например, по оценкам биологов, строительство плотины в Пенжинской губе Охотского моря нанесет непоправимый вред популяции охотморской сельди. При строительстве плотины в зоне умеренного климата возможно образование зоны сероводородного заражения, подобной тем, которые наблюдаются в заливах и бухтах, имеющих естественные пороги. Фиорды Скандинавского полуострова, имеющие естественный порог, представляют собой классический пример такого естественного сероводородного заражения.

В заключение упомянем некоторые проекты использования энергии океана, которые еще не так хорошо разработаны, как волновые преобразователи. Разница температур поверхностного слоя океана и глубинных слоев достигает 20–25 °С. Идея использования разности температур между поверхностными и глубинными слоями океана для выработки электроэнергии высказал еще в 1871 г. французский инженер Ж. Клод. Используя

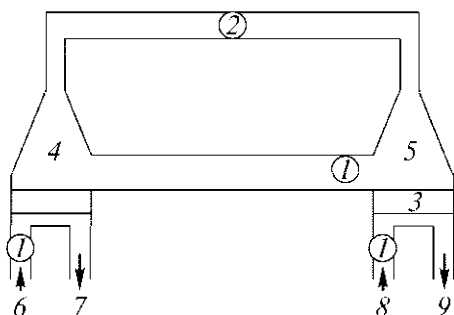


Рис. 21.9. Схема оканической термоэнергетической установки: 1 — насос, 2 — турбина, 3 — теплообменник, 4 — испаритель, 5 — конденсатор, забор и сброс теплой воды, 8,9 — забор и сброс холодной воды

эту разность температур, можно построить обычную тепловую машину (рис. 21.9). Наиболее эффективно работают станции при перепаде температур около 25°C . В 1927 г. на Кубе была построена установка, работающая на разности температур между поверхностными и глубинными слоями океана 22 кВт. В 1960 г. во Франции (на африканском берегу близ Абиджана) была построена подобная энергетическая установка мощностью 75 МВт. Градиент температуры между слоями океана может быть использован не только для производства электроэнергии, но и в технологических целях (кондиционирование, хранение пищи и т. п.). Потенциал этого источника энергии огромен. Во Франции создана государственная корпорация, занимающаяся разработками проектов использования энергии океана.

Ряд районов океана характеризуется мощными течениями, которые могут быть использованы для работы электрогенераторов. Только механическая энергия морских течений оценивается в $3,5 \cdot 10^{14}$ Вт. Полное использование энергии только одного Гольфстрима обеспечило бы энергией все человечество. Установив поперек Гольфстрима на протяжении 350 миль генераторы с диаметром рабочего колеса 80 м, можно получить энергию, равную 10% потребляемой всем человечеством. Пока такие идеи кажутся фантастическими, однако проекты использования энергии Гольфстрима разрабатываются в таких крупных фирмах, как «Локхид».

Эксперименты, проведенные в нескольких регионах Мирового океана, показали эффективность выращивания водорослей для последующего получения из них метана. Питательные вещества поставляет океан, энергию — Солнце. Например, ферма площадью 40 000 га может обеспечить энергией жителей города с населением 50 000 человек. На Гавайских островах существует

лаборатория естественных источников энергии, в которой занимаются разработкой перспективных методов и средств использования океанской энергии.

Ветровая энергетика

Человечество давно использует энергию ветра. Парусные суда — основной вид транспорта, который в течение столетий обеспечивал связь людей различных континентов, представляют наиболее яркий пример использования ветровой энергии.

Другой хорошо известный пример эффективного использования ветровой энергии — ветряные мельницы. Первые ветряные мельницы появились в Иране около 2000 лет назад. Они имели вертикальную ось вращения. В Европе ветряные мельницы появились намного позже и имели горизонтальную ось вращения. В Голландии ветряные мельницы широко использовались до недавнего времени для размола зерна и для откачки воды из полейдеров (обвалованные пониженные участки суши).

В середине XIX в. была распространена ветряная мельница с большим числом лопастей. Эти многолопастные ветряки широко применялись для подачи воды из колодцев. В конце XIX в. века наступил новый этап использования ветровых установок — они начали применяться для выработки электроэнергии. В 30-е гг. XX в. миллионы ветровых электрогенераторов мощностью около 1 кВт использовались в сельской местности Европы, Америки, Азии. В Советском Союзе в 1931 г. в Крыму была построена ветроэнергетическая станция мощностью 100 кВт, в то время она была самой мощной в мире. В 1956 г. в СССР производилось девять тысяч ветроэнергетических установок мощностью 20–50 кВт. Однако по мере развития центрального электроснабжения, появления экономичных и надежных дизельных генераторов распространение ветровых электрогенераторов резко упало.

С ростом стоимости ископаемого топлива и осознания экологических последствий его применения надежды многих исследователей опять стали связываться с ветровой энергетикой. Начался этап возрождения ветровой энергетики. Рассмотрим, следуя работам [31, 108, 146], ее современное состояние.

Действительно, ветровой потенциал огромен — около 2000 ТВт составляет мощность ветрового потока в атмосфере. Использование даже небольшой части этой мощности привело бы к решению энергетических проблем человечества. Практически можно использовать не более 10% этих запасов. Для систематизации ветроэнергетических характеристик составляются так называемые ветроэнергетические кадастры. В кадастре

содержатся следующие характеристики ветрового потока: среднегодовая скорость, повторяемость скоростей ветра, годовой и суточный ход скорости ветра, максимальная скорость ветра и др. Кадастр позволяет определить возможные районы размещения установок и режимы их работы. Главные недостатки ветровой энергетики — низкая энергетическая плотность, сильная изменчивость в зависимости от погодных условий, ярко выраженная географическая неравномерность распределения ветровой энергии. Для компенсации изменчивости применяют комбинированные установки, например включающие ветрогенератор и солнечный фотопреобразователь. Кроме того, ветровые электрогенераторы имеют широкий спектр отрицательных экологических эффектов, выявленных только после того, как в 70-е гг. XX в. начался период возрождения ветровой энергетики.

Эффективность работы ветрогенератора зависит от скорости ветра и длины его лопастей. Величина вырабатываемой энергии пропорциональна кубу скорости ветра и квадрату длины лопастей. Эти зависимости обусловили экономическую выгодность конструирования крупных ветрогенераторов, которые предназначены для работы на больших высотах. (Зависимость скорости ветра от высоты обычно имеет логарифмический характер.) Рабочий диапазон скоростей ветра крупных ветровых установок составляет от 5 до 15 м/с. При скорости ветра меньше 5 м/с эффективность работы установки падает. При скоростях ветра больше 15 м/с велика вероятность поломки конструкции, прежде всего лопастей. Размещение генераторов на больших высотах (там, где больше скорость) выдвигает повышенные требования к прочности конструкции высотных мачт, которые должны обеспечивать удержание при мощной ветровой нагрузке ротора, коробки передач и генератора.

В настоящее время сооружаются ветровые генераторы большой, средней и малой мощности. К генераторам большой мощности относятся установки мощностью более 1 МВт. К установкам малой мощности — установки до нескольких десятков кВт. Типичная установка большой мощности «МОД-2» фирмы «Boeing Engineering», рассчитанная на выработку 2,5 МВт при скорости ветра около 12 м/с. Такая установка имеет башню высотой около 60 м, лопасти длиной 92 м и массой 80 т и способна выдержать ветровой напор при ураганной скорости до 56 м/с.

Крупные ветроэнергетические установки оказались сложны в эксплуатации. При резком усилении скорости ветра неоднократно выходили из строя основные элементы конструкции — лопасти, горизонтальные оси. Разработка и создание более надежных конструкций значительно удорожает стоимость ветровых установок.

Примером установок средней мощности являются ветровые генераторы фирмы «Westinghouse» мощностью 200 кВт и фирмы «U. S. Wind Power» мощностью 50 кВт. Последняя фирма соорудила в начале 80-х гг. в районе Альтамонт-Пасс (штат Калифорния), который характеризуется сильными устойчивыми ветрами, 4000 ветровых генераторов мощностью 50–200 кВт. Планируется удвоить количество ветровых генераторов в данном районе.

Упомянем об еще одном новом направлении возобновляемой энергетики — солнечно-ветровой и вихреэнергетике. В системах солнечно-ветровой энергетики энергия солнечного излучения трансформируется в энергию ветрового потока. Вихреэнергетика использует вихревые структуры, которые являются концентраторами кинетической энергии в воздушном и водном потоках. Первоначально планировалось использование природных вихревых систем, однако эксперименты показали сложность реализации данной идеи из-за трудности управления вихревой структурой. В Испании в 1981 г. был построен солнечно-ветровой генератор. Солнечный коллектор с диаметром 122 м и высотой около 2 м был покрыт пленкой. Нагретый воздух поступал в трубу диаметром 10 м и высотой 200 м. Поднимающийся воздушный поток вращал колесо генератора. Средняя мощность установки составила 36 кВт.

Дополнительные приспособления позволяют создать или усилить вихревую составляющую воздушного потока в солнечно-ветровых установках. Во вращающемся потоке возрастает скорость потока, набегающего на турбину, по сравнению с прямолинейным потоком и как следствие возрастает выходная мощность генератора. Модели таких солнечно-вихревых генераторов были изготовлены и испытаны в РФ.

Перспективным направлением развития ветровой энергетики стало создание шельфовых ветровых электростанций. Размещение ветроэнергетических станций на шельфе сразу снимает множество проблем, обусловленных отрицательным воздействием ветровых электростанций на окружающую среду. Скорость ветрового потока над водой выше, чем над сушей. Такие компании, как «Nordex», «Westas» производят ветровые турбины мощностью до 2,5 МВт для установки на шельфе. Высота башни

такой ветроэнергетической станции составляет около 100 м, диаметр лопастей равен 80 м. Фирмами «Enercon», «Acrodin» разрабатываются проекты электростанций мощностью до 5 МВт. В Германии на шельфе Балтийского моря сооружается ветроэнергетическая станция мощностью 50 МВт. На шельфе Шлезвиг-Гольштейн (Германия) планируется сооружение ветровой электростанции общей мощностью 300 МВт. В Дании введено в строй пять шельфовых станций мощностью по 150 МВт каждая. В случае успешной реализации проекта Дания намеревается увеличить мощность шельфовых станций до 6 000 МВт, на которых будет вырабатываться около 50% электроэнергии, потребляемой в стране. Следует отметить, что ветроэнергетический ресурс стран, расположенных на берегах Северного моря — Великобритании, Германии, Нидерландов, Дании и Бельгии, в несколько раз превышает их суммарный объем электропотребления.

Оригинальную ветроэнергетическую установку, предназначенную для размещения на шельфе, разработали во Владивостоке. В основе установки лежит медленно вращающийся ротор диаметром 300 м. Ротор свободно лежит на воде, по его периметру установлены лопасти, которые преобразуют ветровое давление в крутящий момент. Зимой, после установки ледового покрытия, ротор просто приподнимается над льдом. Мощность ветроэнергетической установки составляет 1–20 МВт. Важным преимуществом конструкции является отсутствие быстровращающихся частей, вибраций и инфразвуковых излучений. Поэтому такая установка не имеет вредных воздействий на окружающую среду.

Строительному буму ветроэнергетических станций в Европе, США, странах Азии способствует специальная налоговая политика. Например, в Германии федеральное правительство выплачивает тем, кто вкладывает капитал в ветроэнергетические системы, по 8 пфеннигов за каждый поставленный киловатт-час. В США, Индии были приняты законы о временном освобождении от налогов владельцев ветровых генераторов. Наряду с экономическими мерами активно используются и административные меры, например, в штате Калифорния с целью уменьшения загрязнений атмосферы предусматривается обязательный переход от газового и электрообогрева на использование солнечных обогревателей.

Широкому использованию маломощных ветровых генераторов мешает их относительно низкая надежность, непродолжительный срок службы и более высокая себестоимость электроэнергии по сравнению с традиционными источниками

электроэнергии. Однако себестоимость ветровой электроэнергии примерно в 1,5–2 раза ниже себестоимости электроэнергии, полученной в фотоэлектрических преобразователях.

Экологические последствия ветровой энергетики

Ветровая энергетика не потребляет ископаемое топливо, не использует воду для охлаждения и не вызывает тепловое загрязнение водоемов, не загрязняет атмосферу. И тем не менее она оказывает, как выяснилось, отрицательное воздействие на окружающую среду.

Ветровые генераторы являются мощными источниками шума. Значительная часть звуковой энергии приходится на инфразвуковой диапазон, для которого характерно отрицательное воздействие на организм человека. Академик В. В. Шулейкин обратил внимание, что инфразвуковые колебания образуются при обтекании ветровым потоком штормовых волн. Так как скорость распространения инфразвуковых волн больше скорости распространения поверхностных гравитационных волн, а диссипация мала, то инфразвуковые волны приходят из штормовой области в точку наблюдения гораздо раньше, чем ветровые волны. Именно поэтому инфразвуковые волны играют роль предвестника шторма и могут быть использованы для определения области шторма. Кстати, по предположению некоторых ученых, мощные инфразвуковые волны, образующиеся во время шторма, могут быть причиной возникновения кораблей-призраков типа «Летучего голландца».

Природными источниками инфразвука являются землетрясения, извержения вулканов, раскаты грома, штормы, встры [34]. Например, мистраль на юге Франции создает инфразвук с частотой 0,6 Гц. Искусственные источники инфразвука более разнообразны. Это взрывы, в том числе атомные, выстрелы из тяжелых орудий, вибрация зданий, конструкций, механизмов, вентиляционных систем, двигателей и т. п. Обычно искусственные источники имеют ярко выраженные частоты.

Физиологическое действие инфразвука еще полностью не исследовано. Инфразвук оказывает весьма существенное влияние на человека, в частности на его психику. В литературе неоднократно отмечались случаи самоубийств под воздействием мощного источника инфразвука. Хорошо установлено, что его влияние на человека связано с резонансами внутренних органов. Исследователи отмечают три главных резонанса — 5, 10 и 15 Гц. Различные органы имеют собственные резонансные частоты. В области инфразвука лежат резонансы органов брюшной полости,

поэтому в первую очередь действие инфразвука на человека, связано с нарушением действия желудочно-кишечного тракта — появляются тошнота, головокружение, чувство страха, ужаса.

Поскольку длины волн инфразвука значительно больше размеров человека, то он подвергается его воздействию синфазно. Это существенно для всех воздушных пузырьков и включений в теле человека, например, в среднем ухе, в легких.

В случае резонансов воздействие инфразвука может приводить к большим периодическим смещениям органов и тканей. При больших интенсивностях (свыше 170 дБ) инфразвук может приводить к разрывам и кровотечениям. Отмечается некоторое подобие действия инфразвука и алкоголя. Основной особенностью воздействия инфразвука на человека является то, что он не воспринимается непосредственно органами чувств. Из очевидных последствий, обнаруженных на добровольцах, облучавшихся инфразвуком, отметим следующие:

- изменение артериального давления и частоты сердечной деятельности;
- нарушение вестибулярных функций мозга;
- нарушение зрения;
- нарушение работы желудочно-кишечного тракта, тошнота, рвота;
- появление чувства страха, ужаса.

Так как скорость вращения лопастей ветровых генераторов близка к частоте синхронизации телевидения ряда стран, то работа ветровых генераторов нарушает прием телепередач в радиусе 1–2 км от генератора. Ветровые генераторы являются также источниками радиопомех. Применение лопастей из стекловолокна приводит к значительному уменьшению зоны радиопомех. Вращение лопастей ветровых генераторов губит птиц. Так как обычно ветровые установки располагаются в больших количествах в районах сильных ветров (хребты, морское побережье), то они могут приводить к нарушению миграции перелетных птиц. Модуляция ветрового потока лопастями создает некоторое подобие регулярных структур в воздухе, которые мешают ориентации насекомых. В Бельгии установили, что это приводит к нарушению устойчивости экосистем полей, расположенных в зоне ветровых установок, в частности наблюдается падение урожайности.

Вращающие лопасти в яркий солнечный день создают сильные блики, которые нарушают не только зрение, но и психическое состояние человека.

Наконец, ветровая энергетика требует больших площадей для размещения установок. При близком размещении ветровых энергетических установок имеет место их взаимовлияние, приводящее к снижению мощности. Считается, что расстояние между отдельными установками должно быть не менее 10–20 диаметров ветрового колеса. Поэтому системы ветровых установок стараются размещать в безлюдной местности, что в свою очередь удорожает стоимость передачи энергии.

В настоящее время в мире начался переход от исследовательских работ в области ветровой энергетике к их широкому внедрению. В 2000 г. суммарная мощность ветроэнергетических станций в мире составила 13 500 МВт. Темпы развития ветровой энергетике в таких странах как США, Германия, Бельгия, Великобритания, Норвегия, имеющих высокий ветроэнергетический потенциал, остаются очень высокими.

В РФ в настоящее время действуют: Калмыцкая ветроэнергетическая станция мощностью 1 МВт, Воркутинская мощностью 1,5 МВт (мощность станции в момент пуска всех блоков составит 2,5 МВт), Ростовская ветроэнергетическая станция мощностью 0,6 МВт, Башкирская ветроэнергетическая станция мощностью 2,2 МВт. Эти станции включены в единую электросеть. Наряду с ними действует ряд ветроэнергетических станций, не включенных в энергосистему страны. Например, в Калининградской области действует одна станция мощностью 600 кВт и две станции по 225 кВт. На острове Беринга эксплуатируется ветровая электростанция мощностью 250 кВт фирмы «Micon».

Геотермальная энергетика

Геотермальная энергия — это энергия, внутренних областей Земли, запасенная в горячей воде или водяном паре. В 1968 г. на Камчатке в долине реки Паужетка была пущена первая в СССР геотермальная тепловая станция мощностью 11 МВт, станция работает до сих пор и дает самую дешевую электроэнергию на Камчатке. На Паратунском месторождении (Камчатка) в 1967 г. была создана экспериментальная установка мощностью 750 кВт. На установке исследовался бинарный цикл работы станции. При бинарном цикле турбину вращали пары фреона, который закипал в теплообменнике от теплоносителя с температурой 78 °С. В настоящее время в мире более 500 геотермальных установок работают на основе этого принципа. Исследовательская работа

на Паратунской геотермальной станции продолжается и сейчас. В 1999 г. введена в строй Верхне-Мутновская геотермальная электростанция мощностью 12 МВт. Начаты работы по сооружению первой очереди Мутновской геотермальной станции мощностью 50 МВт (два блока по 25 МВт).

В отдаленных районах стоимость энергии, получаемой на геотермальных станциях, оказывается ниже стоимости энергии, получаемой из привозного топлива. Геотермальные станции успешно функционируют в ряде стран — Филиппины, Италия, Исландия, США, Новая Зеландия, Индонезия. Первая в мире геотермальная электростанция была построена в 1904 г. в Италии. Геотермальная энергия в Исландии начала использоваться в 1944 г. Однако интерес к использованию геотермальной энергии резко вырос в 60–70 гг. При благоприятных природных условиях использование геотермальных энергоносителей оказывается в 2–5 раз выгоднее традиционных тепловых и атомных энергоустановок. Кратко рассмотрим использование геотермальной энергии [31, 108].

В США в Калифорнии в начале 90-х гг. XX в. действовало около 30 станций общей мощностью 2400 МВт. Пар для этих станций извлекался с глубин от 300 до 3000 м. В этом штате США за 30 лет мощность геотермальных станций возросла почти в 200 раз. Таковы темпы развития геотермальной энергетики. Оборудование и эксплуатация геотермических станций достаточно просты, так как нет проблемы доставки топлива, удаления золы, нет топки и трубы. Типичная станция работает на паре 10–15 скважин. Поэтому невелики и затраты на создание станций малой и средней мощности.

В верхнем пятикилометровом слое земной коры содержится 85 млн км³ горячей воды, ее тепловая мощность равна 570 млрд т условного топлива. Наиболее доступна геотермальная энергетика в зонах повышенной вулканической деятельности и землетрясений. Такая привязка к определенным районам является одним из недостатков геотермальной энергетики. Гейзеры — это хорошо известная форма поступления на поверхность Земли горячей воды и пара. По оценке Геологического управления США, разведанные источники геотермальной энергии могли бы дать 5–6% современного потребления электроэнергии в стране. Оценка перспективных источников геотермальной энергии даст величину примерно в 10 раз большую. Однако эксплуатация некоторых этих источников пока нерентабельна. Наряду с этими ресурсами, которые уже могут быть использованы для выработки электроэнергии, в еще большем количестве имеется

вода с температурой 90–150 °С, которая пригодна как источник тепла для обогрева. В перспективе для извлечения энергии из недр Земли можно использовать не только запасы горячей воды и пара, но и тепло сухих горных пород (такие области сухих горных пород с температурой около 300 °С встречаются значительно чаще, чем водоносные горячие породы), а также энергию магматических очагов, которые в некоторых районах расположены на глубинах в несколько километров. Интересно, что идею использования тепла твердых горячих пород высказал К. Э. Циолковский. Тепло сухих горных пород извлекается следующим образом. Сухая горная порода разрушается путем закачивания воды под давлением. После разрушения породы в ее трещины можно закачивать воду с поверхности, а выкачивать уже нагретую воду или пар. Эксперименты показали перспективность этого метода отбора геотермального тепла. Вопрос об использовании энергии магмы еще не решен и только разрабатывается. Однако гидротермальные ресурсы России незначительны и геотермальные станции могут играть только вспомогательную роль.

Геотермальная энергия используется для выработки электроэнергии и для получения тепла. Форма поступления геотермальной энергии определяет и форму использования (рис. 21.10).

Оптимальная форма — сухой пар. Он может быть непосредственно использован для выработки электроэнергии на турбинах. Конденсированная вода возвращается в землю или поверхностный водоем, если она не содержит вредных примесей. В случае закачки воды в землю образуется замкнутый цикл, загрязнения окружающей среды не происходит. При понижении давления и температуры теплоносителя может иметь место выделение газов и минеральных веществ, с которыми трудно бороться. При поступлении на поверхность горячей воды и пара для их разделения уже необходим сепаратор. Прямое использование смеси пара и воды невозможно, так как геотермальная вода содержит обычно большое количество солей, вызывающих коррозию, и капли воды в паре могут повредить турбину.

Наиболее частая форма поступления энергии — просто в виде горячей воды. Горячая вода используется, прежде всего, для получения тепла. В столице Исландии Рейкьявике (около 100 000 жителей) для обогрева используется, в основном, вода геотермальных источников. Она может быть использована также для получения пара рабочей жидкости, имеющей более низкую температуру кипения, чем вода. В таких станциях используется так называемый бинарный цикл, поскольку имеются две цели

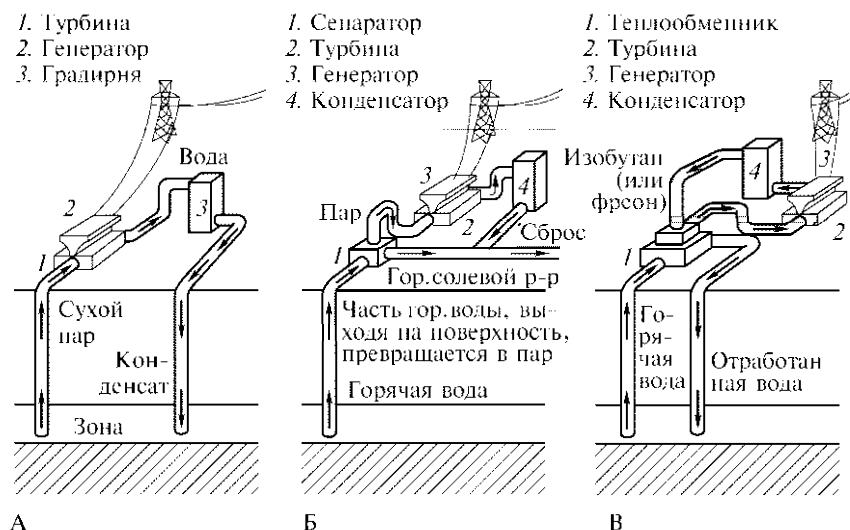


Рис. 21.10. Схемы получения энергии за счет геотермальных ресурсов: А — использование сухого пара, Б — использование горячей воды, В — использование горячей воды путем нагревания рабочей жидкости [108]

жидкостей — водяная цепь и цепь рабочей жидкости. Станция «Хебер» в Калифорнии, работающая по бинарному циклу, имеет мощность 45 МВт. В ее работе используется соленая геотермальная вода с умеренной температурой 150–200 °С, которая не может быть использована для выработки электроэнергии каким-то другим способом.

Так как геотермальный пар и вода имеют сравнительно низкую температуру и давление, КПД геотермальных станций не превышает 20%, что значительно ниже атомных (30%) и тепловых, работающих на ископаемом топливе (40%).

Использование геотермальной энергии имеет отрицательные экологические последствия. Строительство геотермальных станций нарушает «работу» гейзеров, что наносит невосполнимый ущерб национальным паркам и природным заповедникам. Для конденсации пара на геотермальных станциях используется большое количество охлаждающей воды, поэтому геотермальные станции являются источниками теплового загрязнения. При одинаковой мощности с тепловой или атомной станцией геотермальная электростанция потребляет для охлаждения значительно большее количество воды, так как ее КПД ниже. Сброс сильно

минерализованной геотермальной воды в поверхностные водоемы может привести к нарушению их экосистем. В геотермальных водах в больших количествах содержится сероводород и радон, которые вызывают радиоактивные загрязнения окружающей среды; в незначительных количествах содержатся метан и аммиак, фтор, соли хлора, мышьяк. Скопление сероводорода может представлять опасность для людей и животных. Для очистки вод геотермальных станций иногда требуется принятие специальных мер. Например, в Сальвадоре воду с большим содержанием фтора от геотермальной станции мощностью 30 МВт отводят по специальному трубопроводу в море. Выделение газов из теплоносителя на геотермальных станциях сопровождается мощным шумовым загрязнением.

Наиболее эффективным методом защиты окружающей среды от воздействия геотермальных станций является реинфекция теплоносителя в коллектор и переход от фонтанной технологии подачи теплоносителя к циркуляционной технологии подачи.

Глава 22

Экологические последствия стихийных бедствий

Стихийные бедствия, несмотря на рост человеческих возможностей, продолжают оказывать огромное влияние на уровень жизни многих жителей планеты. Стихийные бедствия отрицательно влияют на миграцию населения, в ряде регионов Земли сводят на нет борьбу с бедностью и болезнями, ухудшают экологическую ситуацию. Невозможно достичь прогресса в социальном развитии, на путях перехода к устойчивому развитию, если в ближайшие годы не будет решена проблема борьбы со стихийными бедствиями.

Представить сложность ситуации на планете, обусловленную влиянием стихийных бедствий, можно на основе следующих данных. Каждые десять лет бедствия уносят более 1 млн человеческих жизней, десятки миллионов человек остаются без крова. За последние 30 лет экономический ущерб от природных катастроф возрос в 3 раза. В начале 60-х гг. ежегодный ущерб от стихийных бедствий составлял 40 млрд долларов, в 80-е гг. он возрос до 120 млрд долларов. Эта тенденция роста экономического ущерба от стихийных бедствий сохраняется.

Приведем список 10 крупнейших стихийных бедствий, причинивших максимальный ущерб и произошедших в период с 1983 по 1994 г.:

- землетрясение (Япония, Кобе, 1994) — ущерб 50 млрд долларов;
- ураган «Эндрю» (США, 1991) — ущерб 30 млрд долларов;
- землетрясение (США, 1994) — ущерб 30 млрд долларов;
- наводнение (США, 1993) — ущерб 12 млрд долларов;
- циклон «Хуго» (Карибский бассейн, 1983) — ущерб 9,00 млрд долларов;

- ураган «Дарья» (Европа, 1994) — ущерб 6,80 млрд долларов;
- тайфун «Мирей» (Япония, 1991) — ущерб 6,00 млрд долларов;
- метель (США, 1993) — ущерб 5,00 млрд долларов;
- снежная буря (Европа, 1987) — ущерб 3,25 млрд долларов.

Колоссальный экономический ущерб стихийные бедствия приносят не только бедным, но и экономически развитым странам. Относительные потери (в % ВВП) от стихийных бедствий ряда слаборазвитых стран огромны. Например, экономический ущерб в Гондурасе от урагана «Митч» в 1998 г. составил около трети ВВП, а число погибших в Гондурасе, Никарагуа, Гватемале превысило 11 тыс. человек. Число человеческих жертв в слаборазвитых странах намного превосходит потери от аналогичных стихийных бедствий в развитых странах. Например, в Японии от стихийных бедствий ежегодно гибнет в среднем около 60 человек, в Перу от подобных стихийных бедствий, при численности населения в 6 раз меньше, гибнет ежегодно около 3 000 человек.

Число жертв от стихийных бедствий растет, прежде всего, в результате неадекватной экологической и социальной политики. Незащищенность от стихийных бедствий обусловлена, прежде всего, ростом городов, экологической деградацией окружающей среды. Стихийные бедствия выступают в качестве расплаты за безразличное отношение к реализации экологически сбалансированного развития. Например, возросшую частоту катастрофических наводнений на реках Китая (в начале XX в. они происходили раз в 20 лет, то теперь, практически, ежегодно), специалисты объясняют уничтожением лесов в верховьях рек. Наводнение на реке Янцзы в 1998 г. унесло 3 700 жизней, привело к переселению около 230 млн человек, уничтожило 25 млн га плодородных земель.

Учитывая важность борьбы со стихийными бедствиями, ООН приняла ряд важнейших мер и пытается проводить специальную политику в регионах, подверженных действию стихийных бедствий.

Каковы экологические последствия природных стихийных бедствий?

Вулканические извержения оказывают мощное прямое воздействие — лава, пепел, камнепады, выделение газов. В зоне

вулканической деятельности разрушаются инженерные сооружения, выпадают кислотные дожди, нарушается почвенный покров, происходит падение скота. Выброс большого количества пепла приводит к уменьшению поступления солнечной радиации на поверхность Земли, наблюдаются значительные отклонения от среднеклиматических значений температуры.

В 1812–1815 гг. произошло 3 мощных извержения вулканов: Сонфисер на острове Сан-Винсент; Майон на Филиппинах, Тамбора в Индонезии. Как следствие, в 1816 гг. наблюдалось резкое похолодание — средняя температура была ниже на 3 °С, этот год получил название «год без лета».

Землетрясения сопровождаются разрушением зданий, инженерных сооружений, промышленных предприятий, что может спровоцировать технологические аварии с тяжелыми последствиями. При землетрясениях изменяются русла рек, происходят оползни и лавины, нарушается почвенный покров. Часто землетрясения сопровождаются голодом и эпидемиями.

При наводнениях разрушается почвенный покров, смываются плодородные почвы, затопляются сельскохозяйственные угодья, разрушаются здания и сооружения, изменяется гидрологический режим водных объектов. Как следствие наводнений происходят эпидемии, гибель урожая, голод.

Ураганы, сильные ветры не только разрушают здания, но и вызывают эрозию почвы. В прибрежных районах ураганы генерируют штормовые нагоны и огромные ветровые волны, которые затопляют значительные территории, вызывают сильные наводнения.

22 декабря 1989 г. на сессии Генеральной Ассамблеи ООН было принято решение начать с 1990 г. Международное десятилетие уменьшения опасности стихийных бедствий (МДУОСБ) резолюция № 44/236. В резолюции ООН № 46/182 от 15 декабря 1991 г. содержится призыв к главам государств, международной общественности о согласованности действий с целью предупреждения катастроф всех форм. Конференция РИО-92 в документе «Повестка дня на XXI век» подчеркивает отрицательное воздействие стихийных бедствий на устойчивое развитие.

Предварительные итоги работы МДУОСБ подведены на Всемирной конференции по уменьшению опасности стихийных бедствий (Япония, Иокогама, 22–28 мая 1994 г.). Участники конференции так описывают ее содержание [153].

Заседание конференции проходило в Главном комитете и 7 технических комитетах:

- А — сообщества, подверженные стихийным бедствиям;
- В — конструкции, устойчивые к стихийным бедствиям;
- С — влияние стихийных бедствий на современное общество;
- Д — взаимосвязь между технологическими и природными бедствиями;
- Е — экологические аспекты уменьшения опасности и устойчивое развитие нации;
- Г — системы оповещения;
- Г — борьба с засухой.

Работала также специальная научно-техническая программа, в рамках которой были заседания «Науки о Земле», «Естественные науки».

Необходимость принятия специальной программы ООН МДУОСБ обусловлена следующим:

- быстрый рост потерь от стихийных бедствий по мере роста численности населения и урбанизации;
- стихийные бедствия подрывают устойчивое экономическое и социальное развитие, вызывают деградацию окружающей среды;
- меры снижения потерь от стихийных бедствий не нашли широкого применения в развивающихся странах, что сдерживает их социальный и экономический прогресс.

В развивающихся странах финансовые потери, гибель людей из-за стихийных бедствий создают комплекс проблем для экономики и социальных служб, что в значительной мере обусловлено отсутствием контроля в области строительства и землепользования. В развитых странах финансовые потери значительно превосходят потери из-за гибели людей. В силу растущей сложности современного общества потери на восстановление инфраструктуры после стихийных бедствий продолжают расти.

В работе конференции в Йокогаме анализу подвергались 200 стихийных бедствий (за 30-летний срок с 1.01.1963 по 31.12.1992): лавины, волны холода, засухи, землетрясения, нехватка продовольствия (голод), пожары, наводнения, нашествие

насекомых, оползни, тепловые волны, ураганы (нетропические), тропические ураганы, цунами, извержение вулканов.

Для оценки последствий стихийных бедствий используются три фактора, характеризующие каждое стихийное бедствие:

- ущерб в отношении к общему объему годового валового национального продукта (ВНП);
- число пострадавших в отношении к общей численности населения;
- число погибших.

Ежегодно от стихийных бедствий страдают до 4,5 млрд человек, число жертв растет на 10 млн в год.

Обычно выделяют три категории стихийных бедствий:

- 1) ущерб в объеме 1% или более от ВНП;
- 2) число пострадавших 1% или более от численности населения;
- 3) число погибших — 100 или более человек.

Оказалось, что число стихийных бедствий по всем трем категориям за 30-летний период четко показывает тенденцию роста, причем наибольший ущерб наносят наводнения, тропические ураганы, засухи, землетрясения. Засуха, тропические ураганы, наводнение затрагивают наибольшее число людей на одно бедствие. Наводнения, тропические ураганы, эпидемии, землетрясения приводят к самому большому числу погибших. Наводнения, тропические ураганы наносят наибольший общий ущерб.

Сейчас общий объем убытков от стихийных бедствий превысил объем международной помощи пострадавшим от стихийных бедствий. Число пострадавших людей в год растет на 6%, что в 3 раза выше темпов прироста населения. Число стихийных бедствий со значительными последствиями растет, растут и темпы их роста. Нет ни одного региона в мире, который бы, в той или иной мере, не был подвержен стихийным бедствиям.

Дадим некоторые данные о стихийных бедствиях по отдельным регионам.

Азия. За 25 лет погибло 3 млн человек, ущерб составил более 200 млрд долларов. Более 50% крупнейших стихийных бедствий происходит в Азии. Только после 1990 г. (начало

МДУОСБ) в 1990–1993 гг. погибло 200 000 человек, ущерб достиг 45 млрд долларов. Из-за демографических и экономических факторов растет число людей, проживающих в зонах, подверженных вулканическим извержениям. Наиболее распространенное стихийное бедствие — наводнение. В случае тропических ураганов наибольшие последствия вызывают штормовые приливы, они приходят в район раньше урагана, когда эвакуация населения еще только начинается. За 30 лет в Бангладеш погибло более 750 000 человек (это жертвы 20 тропических ураганов). Уменьшить число жертв способны простые инженерные решения, например, строительство зданий на сваях или сооружение искусственных холмов, на которых собираются жители во время наводнений. Из геологических стихийных бедствий наиболее опасными являются землетрясения, цунами, извержение вулканов, оползни. За последние 300 лет в мире из-за землетрясений погибло около 2,5 млн человек, из них 75% — в Азии.

В южной части Тихого океана находятся 22 островные страны. Крупные острова — вулканического происхождения, мелкие коралловые атоллы, которые не поднимаются выше, чем на 4 м над уровнем моря. Наибольшая опасность здесь — тропические циклоны, цунами. Возникающие при ураганах волны, цунами способны вызвать разрушения на значительной части этих островов. В случае глобального потепления и повышения уровня моря неизбежно возникновение катастрофических последствий в этом регионе.

Важной чертой современных стихийных бедствий является рост числа промышленных аварий и числа попадающих в них людей. Часто промышленные (технологические) аварии являются побочным продуктом стихийных бедствий.

Типичной страной, подверженной стихийным бедствиям, является Япония. Урбанизация привела к тому, что уже в 1958 г. более 75% населения и 75% активов находилось в зоне, опасной для наводнения. В качестве меры борьбы с цунами, ураганами и наводнениями было начато строительство супердамб.

Упомянем интересное следствие урбанизации. Асфальтирование и бетонирование почвы вызывают замедление водостока, потеря водоудерживающей способности почвы приводит к росту периода пикового притока воды и сокращению времени концентрации наводнения.

Степень ущерба существенно зависит от местных условий (географических, геологических и т. д.), поэтому необходимо проводить районирование территории и расселение в соответствии с этими особенностями (т. е. необходимо составление

микрizonaльной карты стихийных опасностей). Необходимо также составлять микрizonaльную карту промышленных опасностей.

Наряду со стихийными бедствиями геофизического происхождения огромны экологические последствия техногенных катастроф. Научно-технический прогресс приводит к необходимости использования сложных инженерных сооружений. Насыщение производства современной техникой приводит не только к росту производительности труда и росту материального благосостояния, но и резко увеличивает цену технической неполадки. Самое совершенное оборудование не может гарантировать полной надежности инженерных систем. Статистические данные свидетельствуют, что 56% крупнейших катастроф XX в. произошло в последние два десятилетия. Стремительно растут и последствия катастроф. На конец столетия падает более 50% погибших и около 40% раненых за время промышленных катастроф XX в. Рост техногенных катастроф хорошо прослеживается по отдельным отраслям промышленности. Например, в химической промышленности рост объема выпуска продукции в 10 раз сопровождается ростом числа катастроф тоже в 10 раз. При этом масштабы катастроф также растут. Можно напомнить трагедию в индийском городе Бхопале, где произошла катастрофа на предприятии фирмы «Юнион Карбид». В результате катастрофы погибло более 3 000 человек, 20 000 стали инвалидами, более 200 000 получили неизлечимые болезни, несколько сот тысяч человек до сих пор подвержены действию различного рода расстройств. В семьях пострадавших, как правило, рождаются больные дети. На предприятиях фирмы «Юнион Карбид» только за пятилетний период с 1980 по 1985 г. произошло более 2 000 аварий.

В последнее время отмечается рост числа многоступенчатых или синергетических видов бедствий (стихийные бедствия вызывают технические катастрофы), вызывающих более пагубные последствия для окружающей среды. Так, землетрясения вызывают активизацию на значительной площади других природных процессов, которые, в свою очередь, обуславливают многочисленные технические аварии. Например, землетрясение в Эквадоре вызвало оползни, которые разрушили нефтепровод, разлив нефти привел к огромным экономическим потерям и экологическим последствиям. В Индии разрушение землетрясением плотины Кояна вызвало волну типа «волны паводка», которая смыла несколько поселков.

Важно различать геофизические явления и вызванные ими стихийные бедствия. Возникновение того или иного геофизического явления не обязательно означает возникновение стихийного бедствия. Приведут ли эти геофизические явления к бедствиям, в значительной степени зависит от готовности к ним и защищенности населения региона. Прогнозирование этих геофизических явлений бывает двух типов:

- оценка возможного риска на основании данных о предыдущих явлениях;
- прогнозирование появления первичных явлений в реальном масштабе времени на основании наблюдений и расчетов с применением детерминистических методов.

Прогнозирование геофизических явлений, которые могут вызвать стихийные бедствия, уже дает положительные результаты. В США, несмотря на увеличение численности подверженного риску населения, за последние годы число погибших от торнадо и тропических циклонов уменьшилось. Это было достигнуто более высокой степенью готовности населения, спасательных служб к таким явлениям, внедрением надежных систем связи, повышением точности прогнозов. Однако при этом сохраняется непрерывный рост материального ущерба.

Очень важно для уменьшения последствий стихийных бедствий проанализировать и учесть особенности восприятия населением прогнозов о предстоящих стихийных бедствиях. Анализ реакции населения на предупреждения о надвигающейся стихии в районах, подверженных действию вулканов и цунами, показал, что игнорирование частью населения прогнозов, обусловленное их малой надежностью, иногда приводит к трагическим последствиям. Только повышение надежности прогнозов и разъяснительная работа среди населения позволят устранить предвзятое к ним отношение. Основные меры обеспечения современной стратегии безопасности в условиях стихийных бедствий включают следующие элементы:

- а) оценка риска;
- б) превентивные меры;
- в) своевременное предупреждение и готовность населения.

Предупреждение и готовность к стихийным бедствиям — лучше, чем реагирование на них. Реализация этих мер уже показала

свою эффективность. Например, прогноз извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. и превентивные меры (эвакуация, оповещение, разъяснительная работа среди населения) резко уменьшили потери.

Стихийные бедствия природного характера происходят и в России [96, 97, 98]. Климатические аномалии определяют частоту и интенсивность стихийных природных явлений гидрометеорологического характера. Наиболее часто в России отмечаются землетрясения, наводнения, засухи, ураганы, снегопады, ливни, смерчи. Часто бывают оползни, сели, лавины. Регулярно повторяющиеся смерчи и шквальные ветры в центральной части России наглядно демонстрируют ограниченность возможностей их прогноза и низкую защищенность населения. Экологическими последствиями являются затопление земель, загрязнение поверхностных вод, повреждение лесов. Например, в 1997 г. на территории РФ отмечено 494 опасных природных (стихийных) явления, что на 95 больше, чем в 1996 г. В 1997 г. произошло 117 землетрясений и извержений вулканов, сильные осадки (дождь, снег, град) — 103, сильные ветры — 90 раз. Представление о числе опасных природных явлений (ОПЯ) и возникших чрезвычайных ситуаций за последние годы дает нижеприведенная табл. 22.1.

В 1997 г. возникло 360 чрезвычайных ситуаций, которые были обусловлены опасными природными явлениями. Наиболее часто к чрезвычайным ситуациям приводили погодные условия с сильным дождем и ветром, наводнения, паводки. Данные табл. 22.1 показывают, что при колебаниях числа опасных природных явлений от 300 до 500 в год, хорошо выражена тенденция к увеличению опасных природных явлений, приводящих к чрезвычайным ситуациям. Эта тенденция роста числа ежегодных чрезвычайных ситуаций хорошо согласуется с мировой статистикой роста числа стихийных бедствий. В результате ОПЯ на территории РФ в 1997 г. погибло 74 человека, в 1996 г. — 45 человек.

В заключение упомянем еще об одном геофизическом явлении, которое может привести к экологической катастрофе — это столкновение Земли с астероидом или кометой. Успешная борьба землян с этой угрозой освещена в американском фантастическом боевике «Армагеддон». Расчеты показывают, что вероятность гибели жителя Земли от астероида или кометы соизмерима с риском гибели во время наводнения. Подобные явления имели место в истории Земли. Около 65 млн лет назад астероид диаметром 10 км упал на полуостров Юкатан. Многие ученые связывают вымирание динозавров именно с этим событием. Тунгусский метеорит вызвал только региональную катастрофу,

Таблица 22.1. Опасные природные явления (ОПЯ) на территории РФ и возникшие чрезвычайные ситуации

Явление	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.
Опасные природные явления (всего):	405 (100%)	396 (100%)	468 (100%)	399 (100%)	494 (100%)
в том числе:					
землетрясения, извержения вулканов, цунами	45 (11%)	75 (22%)	105 (23%)	89 (22%)	117 (23%)
сильный ветер (ураганы, тайфуны, бора, метель, пыльные бури)	82 (20%)	75 (22%)	95 (23%)	90 (23%)	90 (18%)
сильные осадки (дождь, снег, град)	96 (24%)	79 (23%)	100 (21%)	85 (21%)	103 (21%)
наводнения, паводки	64 (16%)	33 (10%)	46 (10%)	28 (7%)	67 (14%)
прочие ОПЯ (в том числе, оползни, жара, снежные лавины, лесные пожары)	189 (29%)	84 (23%)	122 (26%)	107 (27%)	117 (24%)
Чрезвычайные ситуации	123	117	273	315	360

встречи Земли с телом подобных размеров происходят примерно через 300 лет. В 1996 г. человечество наблюдало столкновение кометы Шумейкера–Леви с Юпитером. Комета проходила мимо Юпитера, но под действием его мощного притяжения раскололась на части, которые уже упали на Юпитер. Астрономические исследования показывают, что столкновение Земли с астероидом размером в 10 км происходит раз в 60–100 млн лет, размером в 1 км — раз в миллион лет, размером около 100 м — раз в 5 000 лет, размером меньше 100 м — раз в 300 лет. По различным экспертным оценкам существует от 500 до 1 000 астероидов

размером свыше километра, способных вызвать глобальную катастрофу.

В настоящее время разрабатываются системы астероидной защиты Земли, они включают станции наземного наблюдения за телами в околоземном космическом пространстве, космические станции ближнего и дальнего наблюдения. После выявления астероида, представляющего опасность для Земли, предполагается его уничтожение при помощи ядерного оружия. Для этих целей могут быть использованы системы космической обороны, которые разрабатывались в СССР для отражения ракетно-ядерного удара. В США подобные программы известны под названием «звездных войн». Однако применение этих разработок для уничтожения космических тел, угрожающих Земле, требует всестороннего научного анализа. Например, неясны экологические последствия мощного ядерного взрыва в непосредственной близости от Земли. Каково будет его влияние на магнитосферу и атмосферу Земли? Реальным шагом на пути создания системы защиты от космических объектов является проведение совместного эксперимента Российской академией наук и Национального исследовательского комитета Италии по разработке методов и средств дальнего обнаружения астероидов и метеоритов. Эксперимент проводится на базе двух синхронно работающих телескопов, один размещен в Крыму, другой в Медичине (Италия). Эксперименты показали, что такая система из двух телескопов может обнаружить объект диаметром 200 м на удалении 1,8 млн км от Земли.

Наряду с борьбой по уменьшению последствий стихийных бедствий имеет место и противоположная деятельность, целью которой является усиление последствий стихийных бедствий. В литературе сравнительно недавно появились новые понятия, связанные с экологией — экологическая война и экологическое оружие. Хотя есть различные мнения о доступности и эффективности экологического оружия, возможности ведения экологической войны, существует единое мнение, что в основе ведения экологических войн лежит уничтожение или нарушение различных экосистем в военных целях [42]. Предполагается, что в результате воздействия на природную среду, условия нахождения человека (в данном случае — противника) в ней будут существенно нарушены или вообще станут невозможными.

К осуществимым в настоящее время методам ведения экологической войны специалисты относят:

- рассеивание (образование) облаков или тумана;

- градообразование;
 - вызывание дождя, снега, ливней;
 - загрязнение атмосферы радиоактивными, аэрозольными продуктами или газообразными веществами на основе использования атмосферных течений;
 - разрушение дамб, ирригационных сооружений с целью создания волны паводка, наводнений;
 - загрязнение, заражение водоемов;
 - уничтожение почвенного покрова и/или растительного покрова;
- стимулирование схода лавин, оползней.

К возможным и возможным теоретически методам относятся следующие методы ведения экологических войн:

- вызывание ураганов, изменение их траектории;
- вызывание цунами;

инициирование извержений вулканов;

вывод астероидов на территорию противника;

нарушение климата путем уничтожения растительного покрова, разрушения рельефа; инициирование землетрясений.

Большинство перечисленных методов кажутся, на первый взгляд, фантастическими. Но если представить себе возможные последствия ядерной войны, сравнить энергетику антропогенных воздействий и некоторых геофизических процессов, вспомнить некоторые недавние войны, становится понятным, что человечество уже обладает новыми разрушительными способами воздействия на экосистемы, которые могут быть отнесены к экологическим методам ведения войн. Идея о том, что для обеспечения победы в войне необходимо создать немыслимые условия для проживания гражданского населения, была впервые наиболее четко высказана американскими генералами во время Гражданской войны в США. Тогда же были предприняты первые попытки ее реализации.

Нарушение экосистем имело место и во время Второй мировой войны, по оно носило сопутствующий характер. Среди таких воздействий можно упомянуть разрушение фашистами дамб в Голландии (было затоплено 200 тыс. га, что составило 17% пахотных земель), массовые вырубки лесов и посевов на захваченных территориях (20 млн га лесов было уничтожено и нарушено в СССР). Тактика «выжженной земли» широко использовалась фашистами на территории нашей страны для борьбы с партизанами и гражданским населением. Восстановление разрушенных войной сельскохозяйственных экосистем является длительным процессом, например, в европейских странах для этого требовалось около 5 лет. В 1943 г. английская авиация разбомбила плотины в Рурской долине, в результате чего было затоплено несколько десятков предприятий, шахт, электростанций. В 1945 г. при бомбардировке Гамбурга и Дрездена авиацией США и Великобритании предпринимались попытки вызвать «огненные бури». «Огненные бури» — система востров, наподобие смерчей, возникающая при обширных возгораниях, сопровождающаяся выбросом в атмосферу огромного количества сажи и пыли. Серьезным видом экологического ущерба, сопровождающим практически все войны, являются материальные остатки военных действий — это прежде всего мины, неразорвавшиеся бомбы и снаряды.

Приведем некоторые цифры, характеризующие первую войну с широким использованием экологических методов на среде обитания противника — войну США в Индокитае в 1964–1975 гг. За этот период было сброшено 21 млн бомб, выпущено 230 млн снарядов общим весом 15 млн т, что примерно в 3 раза больше числа бомб и снарядов, использованных во Второй мировой войне. С 1964 по 1970 г. 50% территории Южного Вьетнама подверглось воздействию ядохимикатов, 100 тыс. т различных химикатов было рассеяно на площади в 2 млн га. В результате широкомасштабного применения дефолиантов и гербицидов было поражено 44% площади лесов Южного Вьетнама, 45% общей посевной площади. С целью воздействия на погоду было совершено около 2 600 специальных самолетовылетов, во время которых использовались 48 000 канистр с засеивающими агентами. В среднем на каждого жителя Южного Вьетнама пришлось по 3 кг ядохимикатов. Некоторые из этих ядохимикатов содержали диоксины, ничтожная доля которых при попадании в организм человека, вызвала страшные последствия: рождение детей-уродов, раковые и другие тяжелые заболевания. Кроме

того диоксины очень долго сохраняются в окружающей среде, делая землю бесплодной и опасной для использования на несколько десятков лет. За время агрессии США от ядовитых веществ погибло и пострадало более 2 млн жителей Южного Вьетнама. Пострадало и около 60 тыс. американских солдат. Последствия применения ядохимикатов испытывают на себе уже дети и внуки американских солдат.

Самолеты В-52 с высоты 10 км сбрасывали 241-килограммовые бомбы. Часто использовался режим «коврового бомбометания», при котором 93 бомбы сбрасываются на площади в 65 га. Такому бомбометанию было подвергнуто 25% площади Южного Вьетнама. В результате взрывов бомб было выброшено 2 млрд м³ грунта, общая площадь образовавшихся воронок составила 100 тыс. га. Районы, покрытые воронками, практически выведены из землепользования, они превращаются в заболоченные пруды.

В Индокитае применялись эффективные методы уничтожения растительности. Широко использовались ядохимикаты для уничтожения листвы на деревьях. В США были разработаны сверхкрупные бомбы (массой 7 т), которые взрывались на высоте около метра от земли. При этом воронка не образовывалась, однако практически вся растительность и верхний слой почвы буквально сдувались в радиусе 70 м. Подобным образом создавались посадочные площадки для вертолетов. В соответствии со специальной программой «Римский плуг», разработанной для уничтожения растительности, армия США использовала мощные 30-тонные бульдозеры для уничтожения лесов. Для ликвидации плантаций два трактора соединялись цепью длиной около ста метров и двигались параллельным курсом. За несколько лет применения подобных методов были сведены леса на площади 330 тыс. га. Хорошо известна уязвимость почв тропических лесов. Почва, лишенная защитного действия тропических лесов, очень быстро разрушается — смыывается, выветривается, происходит развитие карстовых процессов. В некоторых районах Южного Вьетнама, Лаоса, Камбоджи ее уже практически невозможно восстановить.

Уничтожение растительности на обширных территориях привело к эрозии почвы, изменению ее кислотности и проницаемости, нарушению гидрологического режима. Резко изменился видовой состав флоры и фауны, число видов птиц уменьшилось на порядок, практически исчезли земноводные, насекомые.

Последствия экологической войны в Индокитае ощущаются до сих пор. В пустыни превращены некогда плодородные

пашни В земле осталось около 400 тыс. неразорвавшихся бомб и 2 млн снарядов. Отравляющие вещества, попавшие в почву, продолжают поступать в пищу людей, непосредственно не подвергшихся действию отравляющих веществ.

Другой пример экологической войны — война в Персидском заливе 1990–1991 гг. Во время этой войны целенаправленно уничтожалась природная среда Кувейта. В результате военных действий в Персидском заливе образовались нефтяные пятна общей площадью 10 тыс. км², прибрежная зона была загрязнена нефтяными взвесями на протяжении около 250 км. Всего в воды Персидского залива попало более 1 млн т нефти. Экосистема прибрежной части залива была полностью разрушена, возникла угроза нарушения водоснабжения питьевой водой 18 млн человек. Иракцы при отступлении взорвали более 1200 скважин, из которых длительное время поступала нефть на земную поверхность. Образовавшиеся нефтяные озера покрыли более 60% территории Кувейта. При просачивании нефти из этих озер в почву происходит загрязнение подземных вод.

Ежедневно сгорало более 1 млн т нефти, что составляет 10% суточного потребления нефти в мире. При этом в атмосферу ежесуточно поступало около 70 млн м³ газа, в том числе 50 тыс. т диоксида серы, 100 тыс. т диоксида углерода, 80 тыс. т сажи. Дым распространился на расстояние более 1000 км и достиг границ СССР на севере, Пакистана — на востоке. Пожары в Кувейте являются беспрецедентными по своим масштабам, вероятно, это был самый большой очаг возгорания за всю историю человечества. Густая облачность, образовавшаяся в результате сгорания большого количества нефти, привела к понижению средней температуры воздуха более чем на 10 °С, выпавшие дожди покрыли землю и растительность сажей, серной кислотой, нефтяной пленкой и другими вредными веществами. Загрязнение воздуха вызвало всплеск среди гражданского населения острых респираторных заболеваний, бронхиальной астмы, резко возросла смертность, особенно среди детей. При бомбежках Ирана было сброшено около 85 тыс. т бомб, что превысило общий тоннаж бомб, использованных союзниками во Второй мировой войне. Общие потери Кувейта оцениваются почти в 90 млрд долларов.

Во время войны в Персидском заливе пострадали и солдаты объединенных многонациональных сил: более 30 американских и 500 британских солдат были поражены неизвестной болезнью, в семьях американских военнослужащих, участвовавших в войне,

высок процент рождения больных детей. Среди возможных причин возникновения этого заболевания указывают возможность использования Ираком химического оружия, побочных эффект применения военными медицинскими препаратов, использование в артиллерии армии США слабообогатщенного урана и др.

В заключение упомянем, что применение ядерного оружия, кроме прямых поражающих факторов, может иметь глобальные экологические последствия: возникновение «ядерной зимы», при которой температура на планете может уменьшиться на десятки градусов, резко уменьшится интенсивность солнечного излучения, попадающего на земную поверхность, произойдет нарушение циркуляции атмосферы и океана; радиоактивное загрязнение атмосферы, почвы и вод планетарных масштабов; глобальный голод, возникающий из-за нарушения экосистем и похолодания. Крупномасштабная ядерная война способна вызвать глобальную экологическую катастрофу.

Тропические циклоны

Следуя [95, 103], рассмотрим более подробно тропические циклоны. Тропический циклон (ТЦ) — глубокий циклонический вихрь большой интенсивности и малого диаметра без фронтальной системы. В циклоническом вихре в Северном полушарии вращение происходит против часовой стрелки. Диаметр последней замкнутой изобары и границы облачности тропического циклона изменяются от 300 до 1000 км. Характерной особенностью ТЦ является кольцеобразная система мощных конвективных облаков, формирующих ядро урагана с глазом бури в центре.

Ежегодно на Земле наблюдается около 80 ТЦ. В Северном полушарии наибольшую повторяемость ТЦ имеет в июле сентябре. Зимой они редки. При выходе ТЦ на материк они быстро затухают, однако успевают произвести значительные разрушения. Например, ущерб от воздействия ураганов на территории США оценивается в 100 млн долларов ежегодно, а в годы наибольшей интенсивности превышает 1 млрд долларов. Ущерб от ураганов в США в 1955 г. превысил 2 млрд долларов. Ураган «Флора» в 1963 г. на островах Куба и Таити унес 5 000 жизней, более 15 000 человек остались без крова. В 1944 г. 28 боевых кораблей ВМС США, попав в ураган, получили сильные повреждения, а 3 эскадренных миноносца затонули.

Сильный ураганный ветер вызывает большие нагоны или сгоны. Сочетание астрономических приливов с нагонами и другими типами волн поднимает уровень моря до катастрофических значений. От подобных проявлений ТЦ сильно страдают жители Бенгальского и Мексиканского заливов. В этих районах последствия ураганов часто принимают форму экологических катастроф.

Тропические циклоны зарождаются вместе с облачными скоплениями как возмущения внутритропической зоны конвергенции между 7° – 10° с. ш. и 56° – 15° ю. ш. Во внутритропической зоне конвергенции обычно имеется несколько возмущений, но лишь некоторые из них развиваются в вихри.

В зависимости от максимальной скорости ветра ТЦ подразделяют на тропические депрессии (скорость меньше 17 м/с), тропические штормы (скорость ветра между 17 м/с и 33 м/с) и ураганы со скоростью ветра большей 33 м/с. ТЦ со скоростями ветра больше 33 м/с в различных районах планеты имеют специальные названия: в Северной Атлантике и восточной части Тихого океана — ураганы, в северо-западной части Тихого океана — тайфуны, на Филиппинах — багио, в Австралии — вилли-вилли.

Основными факторами, вызывающими разрушения при прохождении ТЦ, являются ветер, достигающий скорости 100 м/с и больше, волны высотой 20–30 м, штормовые нагоны высотой до 3–7 м и наводнения, возникающие вследствие большого (до 1300 мм/сут) количества осадков. Кроме того, ТЦ вдоль берега с наклонным дном вызывают, так называемые, красные волны, распространяющиеся параллельно берегу, с периодом 5–7 ч, длиной несколько сот километров и высотой около метра. Комбинация этих явлений и обуславливает разрушительное действие циклонов.

Одной из основных характеристик тропических циклонов служит давление в центре «глаза» бури. Минимальное давление, измеренное в центре, равнялось 855 ГПа. По расчетам оно может падать до 847 ГПа. Градиенты давления в стене «глаза» бури очень глубоких циклонов могут достигать значений 50–60 ГПа на 100 км.

Назовем другие основные параметры тропических циклонов: радиус «глаза» бури, максимальная скорость ветра, расстояние от центра ТЦ до области с максимальной скоростью ветра (радиус максимальных ветров), внешний радиус (расстояние от центра до первой незамкнутой изобары), величина фонового давления

(давление на первой незамкнутой изобаре), скорость и направление перемещения ТЦ.

В тропическом циклоне велики тангенциальные составляющие скорости ветра. В среднем они максимальны на расстоянии около 50 км. Далее они убывают и на расстоянии 200 км от центра составляют около трети от максимального значения скорости. Благодаря радиальной составляющей скорости ветра к центру ТЦ сходятся облака и осадки, закручивающиеся по спирали. В центре тропического циклона «глаз» окружен высокой стеной плотных облаков. В этой области наблюдается мощное восходящее движение. В центральной части, в «глазе» бури, наблюдаются штиль, малая облачность и повышенная температура. Иногда повышение температуры достигает 10°C .

Средняя продолжительность жизни ураганов составляет около 6 суток. В процессе эволюции ТЦ средних размеров обычно выделяют четыре стадии: 1 — стадия формирования, 2 — стадия молодого циклона, 3 — стадия зрелости, 4 — стадия затухания. Характеристики ветра и волн на указанных стадиях жизненного цикла ТЦ существенно различаются.

Для волн, образованных полем ветра ТЦ, характерно большое разнообразие высот, периодов, скоростей и направлений распространения. В центральной области ТЦ вследствие интерференции различных систем волн наблюдается толчея. Наиболее опасные высокие волны образуют в правой тыловой по отношению к траектории движения ТЦ половине шторма, где направление ветра совпадает с направлением перемещения ТЦ.

Измерения гидрометеорологических характеристик в ТЦ проводят контактными и дистанционными методами. Контактные измерения выполняют на береговых и островных гидрометеостанциях, на судах и платформах, на буйковых станциях. Дистанционные измерения выполняют на самолетах и метеорологических или специальных океанологических спутниках. Судовые измерения в ТЦ носят случайный характер и, как правило, выполняются на периферии ТЦ.

На платформах в настоящее время получена наиболее подробная информация о ТЦ. Однако расположение платформ определяется не задачами исследования ТЦ, а интересами добычи полезных ископаемых и ограничено пока районами окантического шельфа.

Буйковые измерения, вероятно, являются одним из перспективных средств измерения волн и ветра в ТЦ. В настоящее время большое число буйев, оборудованных измерителями волн,

скорости ветра, температуры и т. д., расположено вдоль Атлантического и Тихоокеанского побережий США, вокруг Японских и Британских островов.

Выполнение прямых измерений динамических параметров атмосферы и океана в ТЦ сопряжено с известными трудностями. Большая часть информации о приводном слое поступает с береговых и островных метеостанций, а также с попавших в зону действия ТЦ судов, которые стараются этого избежать. Вследствие существенной неоднородности полей гидрометеорологических характеристик такая информация дает представление лишь о точечных значениях измеряемых величин. Полное освещение акваторий, подверженных воздействию ТЦ, возможно только на основе спутниковых данных.

В последние 20–25 лет на синоптических картах помещается информация о ТЦ, полученная при помощи метеоспутников, а в отдельных районах океана — при помощи самолетов — это направление и скорость перемещения ТЦ, значение скорости ветра в ТЦ.

Наблюдения из Космоса открывают новые возможности в определении таких характеристик ТЦ, как распределение облачных образований, скорость ветра, давление, параметры волн. Специальные океанологические спутники, оборудованные радиолокаторами с синтезированной апертурой, радиолокационными станциями бокового обзора, скаттерометрами, позволяют измерять ряд характеристик волнения (высоту и фазовую скорость волн, параметры волнового спектра), скорости ветра и приводного слоя, которые не измеряются на обычных метеорологических спутниках. Использование даже ограниченной спутниковой информации позволяет получить более качественную информацию о ТЦ, чем синоптические карты. Такое сравнение информации о ТЦ, получаемой с синоптических карт и спутников, проводилось для Дальнего Востока РФ.

К перспективным дистанционным средствам обнаружения ТЦ относятся загоризонтные радиолокационные станции (РЛС), которые обеспечивают измерение высот волн и скорости ветра на больших площадях с расстояний в несколько тысяч километров. Результаты измерений волн загоризонтной РЛС сравнивали с данными расчетов и буйковыми измерениями. При этом было получено достаточно хорошее соответствие.

Большой объем информации о ТЦ получают с самолетов-лабораторий, которые регулярно используют для зондирования

ядер ТЦ. Эти данные свидетельствуют о значительной изменчивости параметров ТЦ и существующем их отличии от результатов композиционного анализа. Проведены комплексные самолетные радиолокационные измерения в нескольких ураганах. Наиболее подробно исследовался ураган «Апита» (1977), который за время наблюдения развился из слабого в интенсивный вихрь с внутренним конвективным ядром. Использование радиолокаторов, установленных на самолетах, позволяет получать радиальные профили температуры, точку росы, скорость ветра. Обеспечение безопасности полетов накладывает ограничения на высоту полетов, поэтому, как правило, исследования выполняют на уровнях 500 и 700 мбар. Недостаточное распространение и несовершенство дистанционных методов приводит к тому, что определяющая роль в изучении динамических процессов в слое взаимодействия тропических циклонов с поверхностью океана принадлежит пока прямым инструментальным измерениям.

Для исследования общих физических процессов и структурных особенностей, присущих всем ТЦ, используют композиционный анализ данных, при котором происходит объединение характеристик циклонов, находящихся на подобных стадиях развития. Хотя при этом стираются индивидуальные черты каждого урагана, такой подход позволяет компенсировать недостаток натурной информации.

Обобщение данных визуальных наблюдений за высотами волн в 21 тайфуне, полученных с июня 1971 г. в северной тропической зоне Тихого океана, дало возможность построить типовые пространственные распределения высот ветровых волн. Отмечено положение области с максимальными высотами волн в правой тыловой части тайфунов по отношению к направлению их перемещения, что связано с асимметрией полей ветра и существенной поступательной скоростью тайфунов.

Большое количество информации о взаимодействии ТЦ и океана начало поступать в связи с развитием добычи полезных ископаемых на шельфе тропической зоны Мирового океана. Первыми крупными программами по сбору данных с нефтяных платформ, расположенных в Мексиканском заливе, были «Wave project 1» и «Wave project 2», охватившие сезоны ураганов за 1954–1958 и 1960–1963 гг. соответственно.

В 1968 г. восемь американских нефтяных компаний начали сбор гидрометеорологической информации с шести платформ, расположенных в Мексиканском заливе вдоль побережья штата

Луизиана. Эта программа получила название «Ocean Data Gathering Program». В процессе ее выполнения были получены уникальные непрерывные ряды инструментальных наблюдений за скоростью и направлением ветра, высотой волн и атмосферным давлением в период с октября 1968 г. года по ноябрь 1971 г. За это время записана информация об ураганах «Камилла» (1969), «Лаури» (1969), «Селия» (1970), «Эдит» (1971), тропических штормах «Феличе» (1970) и «Сент-Валентин» (1969).

Первым ураганом, во время прохождения которого измерения выполнялись более чем в одной точке, был ураган «Камилла», прошедший между первой и второй платформами. «Глаз» бури прошел в 16 милях к западу от первой станции, в 47 милях к востоку от второй станции и в 90 милях от третьей. За время его прохождения велась непрерывная регистрация скорости и направления ветра, давления и параметров ветровых волн, что позволило построить частотные спектры и двумерные функции распределения высот и периодов волн.

Мексиканский залив в настоящее время является районом, наиболее освещенным информацией об ураганах, где для наблюдений, кроме отмеченных выше средств, используют стационарные автономные буи, специальные платформы и установленные на самолетах радиолокаторы, позволяющие измерять двумерные спектры ветровых волн.

В прибрежной зоне возможно измерение волн придонными датчиками. Так, десять японских метеостанций оборудованы датчиками, установленными на глубине 50 м. Измерения проводят с дискретностью 0,5 с в течение 20 минут через каждые 3 часа. Для ряда ТЦ уже получены записи волн, которые в совокупности с данными океанографических буев, расположенных на большой глубине, используются для проверки и отладки моделей прогноза и расчета ветра и волн в ТЦ.

Сейсмичность

Сейсмологические характеристики землетрясений, происходящих на нашей планете, кратко можно суммировать в следующем виде [16, 121, 126, 161].

Когда возникает землетрясение, часть высвобождающейся энергии превращается в упругие волны — объемные и поверхностные. Объемные волны распространяются внутри Земли и подчиняются законам геометрической оптики, отражаясь или преломляясь у поверхности раздела, где их скорость меняется. Два типа объемных волн соответствуют передаче сжатия и разжатия (волны P) и поперечных смещений (волны S).

Распространение поверхностных волн ограничено областью вблизи свободной поверхности Земли. Эти волны бывают двух типов: волны Рэлея, когда движение частиц происходит в вертикальной плоскости, лежащей в направлении распространения волны, и волны Лява с движением частиц в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны.

Величина смещения в обоих типах волн Рэлея и Лява максимальна на поверхности и экспоненциально убывает с глубиной. Поэтому с помощью этих волн можно эффективно зондировать Землю до глубины, примерно равной одной трети длины волны. Длины поверхностных волн, возбуждаемых при землетрясениях, лежат в интервале от десятков до многих сотен километров. Поверхностные волны от сильных землетрясений настолько интенсивны, что несколько раз обегают вокруг земного шара. Эти волны позволяют получать много информации о недрах планеты. С помощью поверхностных волн детально изучено расположение слоя пониженных сейсмических скоростей в верхней мантии, региональные детали строения земной коры континентов и океанов.

В общем случае под сейсмичностью понимается географическое распределение землетрясений, их связь со строением Земли и распределением по энергиям и магнитудам.

Разрыв сплошных горных пород, вызывающий землетрясение, наступает в результате накопления упругих деформаций выше предела, который может выдержать горная порода. Деформации возникают при относительных перемещениях соседних блоков в коре или мантии Земли. Относительные перемещения блоков не происходят внезапно, в момент разрыва, а нарастают постепенно в течение более или менее длительного времени. Движение в момент землетрясения состоит только лишь из упругой отдачи — резкого смещения сторон разрыва в положение, в котором отсутствуют упругие деформации. Это движение заметно на расстоянии в нескольких километрах от разрыва. Сейсмические волны возникают на поверхности разрыва. Площадь поверхности, с которой они излучаются, сначала очень мала, но затем быстро увеличивается и становится большой. Скорость ее распространения не превосходит скоростей поверхностных волн. Энергия, освобожденная во время землетрясений, до землетрясения была энергией упругой деформации горных пород.

Сейсмические волны — это низкочастотные упругие волны в твердом теле планеты. Размеры очаговой области могут быть порядка нескольких десятков километров. Время, за которое

освобождается основная часть энергии, кроме чрезвычайно сильных толчков, не превосходит одной секунды. При очень сильных землетрясениях количество выделившейся энергии имеет порядок 10^{25} эрг.

Энергия землетрясения — одна из главных физических характеристик сейсмического толчка. В настоящее время для сравнения землетрясений по их силе пользуются шкалой магнитуд, предложенной Б. Гутенбергом и Ч. Рихтером и усовершенствованной рядом других исследователей.

Переход от магнитуды M к сейсмической энергии E , излучаемой из очага землетрясения, возможен с помощью равенства

$$\lg E = 11,8 + 1,5M.$$

В табл. 22.2 приводятся магнитуды и энергии землетрясений по данным К. Касахары ($1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$).

Таблица 22.2. Магнитуды и энергии землетрясений

M	E , Дж	M	E , Дж
8,5	$36 \cdot 10^{17}$	6,0	$6,3 \cdot 10^{13}$
8,0	$63 \cdot 10^{16}$	5,5	$1,1 \cdot 10^{13}$
7,5	$11 \cdot 10^{16}$	5,0	$2,0 \cdot 10^{12}$
7,0	$20 \cdot 10^{15}$	4,5	$3,6 \cdot 10^{11}$
6,5	$36 \cdot 10^{14}$	4,0	$6,3 \cdot 10^{10}$

Данные сейсмологии дают представление о современной сейсмической активности земного шара, а тем самым — об активности глубинных эндогенных процессов.

В осевой части срединно-океанических хребтов глубина очага землетрясений редко превосходит 5 км. При этом по характеру механизма в очаге достаточно четко выделяются два типа землетрясений. Очаги первого типа сосредоточены в пределах узких зон сейсмической активности, протягивающихся вдоль гребня срединно-океанического хребта. В этих зонах возникают роли мелкофокусных землетрясений, глубина очагов которых, как правило, не превышает первых километров от дна. В очагах преобладают механизмы субгоризонтального растяжения в направлении, перпендикулярном простиранию оси срединно-океанического хребта. Срединг — процесс разрастания новообразованной океанической коры в обе стороны от оси разрастания.

Очаги второго типа простираются также в виде достаточно узких зон, как правило, перпендикулярных к генеральному простиранию оси спрединга срединно-океанического хребта. В таких очагах преобладают преимущественно субгоризонтальные сдвиги в направлении, ортогональном простиранию хребта. Сейсмофокальные зоны со сдвиговыми механизмами в очагах землетрясений свидетельствуют о субгоризонтальном смещении краев плит. В абсолютном большинстве случаев каждая такая сейсмическая зона расположена между двумя отрезками оси спрединга. Эта зона фиксирует собой живущий трансформный разлом, который представляет собою линейную тектопическую структуру, при переходе через которую разрастание новой океанической коры меняет свое направление (трансформируется) на противоположное. Глубина очагов вдоль трансформных разломов срединно-океанических хребтов обычно невелика: в абсолютном большинстве случаев она не превышает десятков километров. Простирающиеся в осевой области срединно-океанических хребтов сейсмоактивные зоны маркируют собой смещение краев плит в рифтовых трещинах и по трансформным разломам.

На отдельных участках, таких как треугольник Афар на юге Красного моря или как северное продолжение Калифорнийского залива (трансформный разлом Сан-Андреас), сейсмоактивные зоны переходят на континент, что позволяет проследить родство между геодинамическими процессами, формирующими срединно-океанические хребты и континентальные рифтовые структуры, например, развивающимися в пределах Аденского залива и Восточно-Африканской рифтовой системы.

От описанных выше сейсмоактивных зон срединно-океанических хребтов существенно отличаются те, которые расположены в районах островных дуг и активных континентальных окраин обрамления Тихого океана. Хорошо известно, что характерная особенность таких зон — их пропикновение до очень больших глубин. Глубины очагов землетрясений здесь достигают 600 и более километров. При этом, как показали исследования С. А. Федотова, Л. Р. Сайкса и А. Хасегавы, ширина уходящей в глубь зоны сейсмической активности не превышает 50–60 км. Другая важная отличительная особенность этих сейсмоактивных зон — механизмы в очагах землетрясений, вполне определенно свидетельствующие о сжатии литосферы в районе внешнего края островных дуг и активных континентальных окраин.

Наконец, третья обширная зона сейсмической активности приурочена к Альпийско-Гималайскому поясу. На мировой карте

сейсмичности она представлена в виде широкой вытянутой области как бы беспорядочно рассеянных эпицентров землетрясений. Однако детальные исследования отдельных регионов этого горного пояса позволяют выделить ряд крупных разломов зон, около которых и концентрируется большинство зарегистрированных очагов землетрясений. В пределах разломных зон Альпийско-Гималайского пояса у абсолютного большинства очагов глубина изменяется от 70 до 100 км. Только на четырех участках: в Калабрийской дуге на юге Италии, в Эллинской дуге Восточного Средиземноморья, в районе Вранча в Карпатах, в районе города Хорога между Памиром и Гиндукушем зафиксированы большие глубины очагов. Но нигде в пределах этого горного пояса не установлены сейсмофокальные зоны с очагами глубже 300 км. Механизмы в очагах землетрясений Альпийско-Гималайского пояса достаточно разнообразны. Преобладают сдвиги в условиях сжатия, а также сдвиги или их комбинации. В некоторых случаях зарегистрированы также механизмы растяжения или сдвиги с компонентой растяжения, которые проявляются в литосфере Эгейского моря и его обрамления.

В осях спрединга и трансформных разломах срединно-океанических хребтов выделяется около 3% всей упругой энергии, в Альпийско-Гималайском поясе — около 15%; почти вся остальная упругая энергия выделяется в районах островных дуг. Меньше 1% общей энергии выделяется в очагах, расположенных в пределах самих литосферных плит (Центральная котловина Индийского океана); часто очаги приурочены к районам внутриплитового вулканизма (например, Гавайские острова) и реже — к пассивным переходным зонам атлантического типа.

В последние годы был обнаружен новый тип землетрясений — землетрясения, возбуждаемые инженерной деятельностью человека. Первый документированный случай — (7-балльное землетрясение) был зафиксирован в 1975 г. в г. Орвилл (Калифорния), где за семь лет до этого была возведена самая высокая в США плотина (235 м) и возникло водохранилище. Проявления возбужденной сейсмичности зафиксированы в районе Нурекского гидроузла в Таджикистане, в районе Токтогульской ГЭС в Киргизии. Определенное воздействие на сейсмичность недр может оказывать разработка нефтяных и газовых месторождений (откачка нефти и газа, закачка в скважины воды). К ним относят мощные 7-балльные толчки в районе Газли в 1976 и 1984 гг. Механизм таких землетрясений, скорее всего, связан с увеличением водонасыщенности недр, ослабляющей связи между частицами грунта и тем самым снижающей их сопротивление

хрусткому разрушению при сейсмических толчках. Использование этого механизма рассматривается как перспективный путь ослабления последствий сильных землетрясений с помощью снятия напряжений мелкими сейсмическими толчками благодаря закачке воды в специально пробуренные скважины.

Сейсмические явления относятся к числу самых серьезных по степени влияния на экологию нашей планеты. Наглядное представление об этом даст описание шкалы интенсивности землетрясений разной силы.

Шкала интенсивности землетрясений

- 1 балл (незаметное) — сотрясение, регистрируемое сейсмографами, но не ощутимое для человека.
- 2 балла (очень слабое) — ощущается в отдельных случаях людьми, находящимися в спокойном состоянии.
- 3 балла (слабое) — колебания отмечают немногими людьми.
- 4 балла (умеренное) — землетрясение отмечается многими людьми. Возможно колебание окон и дверей.
- 5 баллов (довольно сильное) — качание висячих предметов, скрип полов, дребезжание стекол, осыпание побелки.
- 6 баллов (сильное) — легкое повреждение некоторых зданий: тонкие трещины в штукатурке, трещины в печах и т. п.
- 7 баллов (очень сильное) — значительные повреждения некоторых зданий; трещины в штукатурке и отламывание отдельных кусков, тонкие трещины в стенах, повреждения дымовых труб. Возникают трещины в сырых грунтах.
- 8 баллов (разрушительное) — разрушения в зданиях: большие трещины в стенах, падение карнизов, дымовых труб. Оползни и трещины шириной до нескольких сантиметров на склонах гор.
- 9 баллов (опустошительное) — обвалы в некоторых зданиях, обрушение стен, перегородок, кровли. В грунтах образуются трещины шириной 10 см и более. Обвалы, осыпи и оползни в горах.

- 10 баллов (уничтожающее) — обвалы во многих зданиях, в других зданиях — серьезные повреждения. Трещины в грунте до 1 м шириной, обвалы, оползни. За счет завалов речных долин возникают озера.
- 11 баллов (катастрофа) — многочисленные трещины на поверхности Земли и вертикальные перемещения по ним, большие обвалы в горах. Общее разрушение зданий.
- 12 баллов (сильная катастрофа) — изменение рельефа в больших размерах. Многочисленные трещины, вертикальные и горизонтальные перемещения по ним. Огромные обвалы и оползни. Изменяются русла рек, образуются водопады и озера. Общее разрушение всех зданий и сооружений.

Степень сотрясения на поверхности зависит от глубины очага (чем больше глубина, тем слабее в общем случае сотрясения) и силы толчка в очаге. Площадь, охваченная сотрясениями, тем больше, чем больше глубина очага и сила толчка в очаге. Приведем сведения о некоторых крупнейших землетрясениях (табл. 22.3).

Вулканизм

Согласно [78, 109], современные вулканы сосредоточены на нашей планете, главным образом, вдоль определенных зон, характеризующихся высокой тектонической активностью. В них тепловой поток в несколько раз выше, чем в спокойных областях. Здесь происходят также и многочисленные землетрясения. Наиболее крупной зоной является Тихоокеанское кольцо, где находятся более 500 вулканов. Из них около 300 извергалось в историческое время. В пределах России в Тихоокеанское кольцо входят вулканы Курильских островов (40) и полуострова Камчатка (28). Наиболее активными по частоте и силе извержения являются вулканы Ключевской, Нарымский, Шивелуч, Безымянный, Кеудач, Кроноцкий.

Вторая крупная зона вулканов протягивается через Средиземноморье, Иранское плоскогорье к Зондскому архипелагу. В ее пределах находятся такие вулканы, как Везувий (Итальянский полуостров), Этна (остров Сицилия), Салторин (Эгейское море). На Большом Кавказском хребте к нему относятся Эльбрус и Казбек. В Закавказье разместился вулкан Арарат. На хребте Эльбурс, обрамляющем с юга Каспийское море, расположен вулкан Демавенд. На Зондском архипелаге известно 63 (из которых 37 — действующих) вулкана.

Таблица 22.3. Крупнейшие землетрясения

Дата	Место	Число погибших	Магнитуда
1456 г.	Неаполь	30 000	
1556	Шаньси	830 000	
1716	Алжир	20 000	
1755	Лиссабон	60 000	
1759	Баальбек	20 000	
1783 86	Лалабрия	60 000	
1819	Кач (Индия)	1 800	
1883, 28.07	Искья (Италия)	2 300	
1891, 28.10	Мино-Овари (Япония)	7 300	
1897, 12.04	Ассам	1 542	8,7
05.08	38° с. ш. 143° в. д.		8,7
20.09	6° с. ш. 122° в. д.		8,7
1899, 10.10	Якутат (Аляска)		8,6
1902, 22.08	40° с. ш. 77° в. д.		8,6
1905, 04.04	Кангара (Индия)	19 000	8,6
23.07	49° с. ш. 98° в. д.		8,7
1906, 31.01	Колумбия		8,9
17.03	Тайвань	1 250	
18.04	Сан-Франциско	700	8,3
17.08	Вальпараисо		8,6
1908, 28.12	Мессина	82 000	7,5
1911, 03.01	Тянь-Шань		8,7
1915, 13.01	Авеццано (Италия)	30 000	
1917, 01.05	29° ю. ш. 177° з. д.		8,6
26.06	15° ю. ш. 173° з. д.		8,7
1920, 16.10	Ганьсу	180 000	8,6
1923, 01.09	Кванто (Япония)	140 000	8,2
1927, 07.03	Тагто (Япония)	3 000	7,9

Продолжение таблицы см. на следующей странице

Продолжение табл. 22.3

Дата	Место	Число погибших	Магнитуда
1929, 07.03	51° с. ш. 170° з. д.		8,7
1930, 26.11	Идзу (Япония)		
1933, 03.03	Саприку	3 000	8,9
1935, 31.05	Кветта (Белуджистан)	30 000	
1938, 01.02	5° ю. ш. 130° в. д.		8,6
1939, 25.01	Консепсьон (Чили)	25 000	8,3
26.12	Турция	25 000	7,9
1940, 10.11	Карпаты (Румыния)	1 000	
1942, 24.08	15° ю. ш. 76° з. д.		8,7
1943, 10.11	Тоттори (Япония)	1 400	7,4
1944, 15.01	Сан-Хуан (Аргентина)	5 000	
1946, 10.11	Анкаш (Перу)	1 500	7,4
1948, 28.06	Фукуи (Япония)	5 300	7,3
05.10	Туркмения (Ашхабад) Иран	3 000	7,3
1949, 05.08	Амбато (Эквадор)	6 000	6,75
1950, 15.08	Ассам	1 526	8,7
1951, 06.05	Сан-Сальвадор	4 000	
1952, 04.03	Токаити (Япония)	600	8,3
1953, 09-13.08	Ионические острова (долгое и сильное)	500	7
1954, 09.09	Орлеанвиль	1 250	6,7
29.03	Гранада (Испания) (глуб. 640 км)		
1955, 17.02	Липари (Италия)		
1956, 09.07	Сапгорин (Греция)	53	7,7
1957, 04.12	Монгольский Алтай	20	8,6
13.12	Курдистан	2 000	7,25
25.04	Фессалия (Греция)		7,25
1960, 29.11	Агадир (Марокко)	10 000	
24.04	Лар (Иран)	1 000	6,75
22.05	Чили (главный толчок)	5-10 тыс.	8,9 (8,6)
1963, 26.07	Скопле (Югославия)	1 078	6,3

Третья вулканическая зона протягивается вдоль Атлантического океана. Здесь насчитывается более 70 вулканов, из которых 39 извергались в историческое время; 40 вулканов расположено на острове Исландия, из них 27 относятся к действующим в настоящее время.

Четвертая зона занимает Восточную Африку (около 40 вулканов, из которых 16 действующих). Среди них вулкан Килиманджаро. За пределами этих зон на материках вулканы встречаются относительно редко. Это объясняется приуроченностью указанных зон к тем или иным видам границ плит, на которые поделена литосфера Земли.

Вдоль осевых зон срединно-океанических хребтов в океанах прослеживаются многочисленные вулканические постройки, которые, наряду с целевыми экструзивными аппаратами, участвуют в процессе формирования новой океанической коры нашей планеты. Процесс формирования сопровождается землетрясениями, высоким тепловым потоком, существенной гидротермальной деятельностью, рудообразованием и т.д. Эта сейсмовулканическая зона длиной около 70 тыс. км прослеживается во всех океанах Земли.

В океанических областях на дне имеется и значительное число вулканических гор. Особенно много их в Тихом океане. Вершины их плоские. Получены свидетельства тому, что вершины таких вулканов существовали у поверхности вод океана. Разрыв вершин волнами и надстройка кораллами вулканических построек по мере отодвигания литосферной плиты от оси срединно-океанического хребта приводили к выхолаживанию рельефа вершин и постепенному их погружению на значительные глубины. Такие неактивные подводные вулканы называются гайотами.

Наиболее существенными для экологии являются последствия извержений вулканов. Есть три основные характеристики извержения: его масштаб (объем изверженных продуктов), состав извергаемого материала и динамика извержения (эффузивная, экструзивная, эксплозивная, комплексная).

По масштабу все вулканические извержения можно разделить на пять классов:

- 1 класс — объем изверженного материала более 100 км^3 ;
- 2 класс — от 10 км^3 до 100 км^3 ;
- 3 класс — от 1 км^3 до 10 км^3 ;
- 4 класс — от $0,1 \text{ км}^3$ до 1 км^3 ;

5 класс — менее $0,1 \text{ км}^3$.

Из исторических извержений к первому классу относится, видимо, только извержение вулкана Тамбора в 1815 г. в Индонезии.

Ко второму классу относятся извержения вулкана Косигуина в Центральной Америке в 1835 г., извержение трещины Лаки в Исландии в 1783 г., Кракатау в Индонезии в 1883 г., Катамаи на Аляске в 1912 г. Из сказанного видно, что извержения второго класса также единичны.

К третьему классу только в пределах Курило-Камчатской дуги в текущем столетии относятся извержения вулкана Севергипа в 1933 г., Безымянного в 1956 г., Шивелуча в 1964 г., Толбачика в 1975–1976 гг. В целом, можно сказать, что число извержений данного класса, приходящихся на столетие, на 1,5–2 порядка больше извержений второго класса.

Число извержений четвертого класса еще больше. К четвертому классу в пределах Курило-Камчатской дуги относятся извержение вулкана Алаид в 1972 г., извержение вулкана Тятя в 1973 г. и вулкана Ключевская Сопка в 1966 г.

К пятому классу относятся многочисленные извержения вулкана Безымянного после 1956 г., извержение кальдеры Заварицкого в 1957 г., вулкана Сарычева в 1960 г. и др.

По своей динамике извержения могут быть разделены следующим образом:

- эффузивное — если извержение в основном сводится к извержению лавы;
- экструзивное — если оно характеризуется в основном выжиманием лавовых куполов;
- эксплозивное — если главную роль в извержении играют взрывы.

При смешанных эффузивно-эксплозивных, экструзивно-эксплозивных и др. извержениях важной характеристикой является коэффициент эксплозивности, выражающийся в процентах количества пирокластического материала (вулканическая пыль, песок, вулканические бомбы и др.) от общей массы продуктов.

Вулканические извержения в общем можно разделить на наземные (вместе с мелководными) и подводные (глубоководные). Специфику глубоководных извержений определяет давление толщи воды, которое в общем случае выше, чем давление растворенных в магме газов. Поэтому для глубоководных извержений, в отличие от наземных и мелководных, не характерны

вулканические взрывы — им свойственна эффузивно-экструзивная динамика.

Механизм наземного извержения сводится к тому, что первоначально в области вулкана растет сейсмическая деятельность и усиливается выделение дымов из жерла. Это часто сопровождается изменением дебита источников воды и изменением их минерального состава. Сейсмические содрогания почвы показывают, что в глубине происходят смещения горных пород, образование новых и реактивация уже существовавших трещин под напором газов и паров, которые ищут выхода на поверхность. Дым из кратера поднимается все более толстым стволом, превращаясь в тучу на высоте нескольких километров. Дым состоит из мельчайших частиц горных пород, которые под напором паров и газов отрываются от лавы, находящейся еще в глубинах вулкана. Эти частицы составляют вулканический пепел, который начинает сыпаться на склоны вулкана или его окрестности из дымовой тучи в зависимости от того, куда ее повернул ветер. Пепел в виде черного, серого или белого мелкого песка выпадает иногда слоем такой толщины, что под его тяжестью обрывается не только листва, но и ветки деревьев, продавливаются крыши домов и, конечно, вся растительность гибнет.

Водяной пар, скапливаясь в виде туч над вулканом, наконец, разражается ливнями, сопровождающимися сильными грозами (так как частицы пепла при движении в воздухе заряжаются положительным, а капли воды — отрицательным электричеством). Дождь очищает воздух от пепла, а на склонах вулкана захватывает и пепел, выпавший ранее, и создаст потоки грязной воды, грязи с щебнем и глыбами пород, смытыми со склона вулкана. Эти потоки мчатся вниз и производят сильные опустошения на своем пути.

Вместе с пеплом из кратера выбрасываются более грубые материалы — вулканический песок (пыль), лапилли (застывшие в воздухе мелкие куски лавы размером не более грецкого ореха) и бомбы (крупные куски лавы иногда в полете приобретают вид кусков скрученного каната). Эти твердые продукты извержения составляют главную опасность для наблюдателей, которые могут работать во время извержения на вулкане.

Выделения из кратера все усиливаются, и наконец (иногда с явлениями сильного взрыва), в кратере поднимается лава. Лава заполняет его и переливается через самое низкое место его верхнего края, образуя поток, который течет по склону, сжигая все живое и преобразуя существовавший рельеф местности.

Среди явлений, сопровождающих вулканические извержения, можно выделить вертикальные и крутонаклонные взрывы. К ним отнесены эксплозии, при которых угол основной струи взрывного столба с горизонтом составляет $90-60^\circ$. Действие воздушной волны при большинстве таких взрывов за пределами вулканического подножия практически не проявляется. Весь крупнообломочный материал выпадает на склоне вулканического конуса или в пределах кальдеры. Известны очень сильные вертикальные взрывы, срывающие вулканическую вершину. Во время извержения вулкана Сарычева в 1946 г. крупные обломки выпадали на расстоянии до 7 км. Температура падающих на землю обломков может быть 600°C , и при попадании в жилые дома, лес и т. п. они способны вызвать пожары. К косым взрывам относятся те, осевая часть взрывной струи которых составляет с горизонтом угол менее 60° . В отдельных случаях ударное и термическое действие газовой струи может проявляться на расстоянии до 30 км (как это было при извержении вулкана Безымянного в 1956 г.).

При крутых и вертикальных взрывах образуются каменные лавины из раскаленных обломков свежеизлившихся лав и холодных обломков, сформировавшихся при разрушении этим взрывом старых лав. Лавины такого рода обычно далеко за пределы вулканического подножия не распространяются и особой опасности для окрестностей представлять не могут. Исключение представляют собою острова-вулканы. Лавины могут достигать берега моря и расположенных там населенных пунктов.

К числу серьезных опасных явлений, сопровождающих в ряде случаев извержения, необходимо отнести раскаленные потоки рыхлого материала (агломератовые потоки). Эти потоки могут распространяться далеко за пределы вулканического конуса. При извержении вулкана Безымянного в 1956 г. поток распространился на расстояние 18 км, при извержении вулкана Шивелуча в 1964 г. — на 15 км. Потоки могут нивелировать и совершенно изменять облик местности. При извержении вулкана Севергина в 1933 г. была изменена и конфигурация береговой черты.

Еще одним важным опасным явлением являются палящие тучи, температура в которых при направленных взрывах может достигать 900°C (Шивелуч, извержение 1944 г.), а скорость 90 км/час (Шивелуч, извержение 1947 г.). Палящие тучи могут оказывать свое воздействие на удалении до 20-30 км от места извержения.

Для подавляющего числа вулканов Камчатки и Курильских островов длина лавовых потоков не превышает 5–20 км. Исключение составляют Толбачик и Ключевской, радиусы лавовых потоков которых составляют 30–45 км. Грязевые и водные потоки также сопутствуют извержениям и представляют собою реальную угрозу для населения. Движение их происходит со скоростью до 60 км/час и, как правило, подчинено рельефу местности. Потоки могут проходить значительные расстояния. При извержении вулкана Безымянного в 1956 г. — 80 км, Ключевского в 1944–1945 гг. — 35 км, Авачинского в 1938 г. — 18 км.

К явлениям, оказывающим значительное влияние на экологию, следует отнести и пеплогазовые столбы, нередко возникающие над кратером в результате следующих один за другим вертикальных вулканических взрывов. Формирование пеплогазового вулканического столба начинается со взрыва-разрыва на пепловые частицы силикатного расплава высвобождающимися из него магматическими газами. Поэтому в момент рождения в основании пеплогазового столба пепловые частицы имеют ту температуру, которую имела магма перед взрывом. Перед взрывом в магме образуется большое число газовых пузырьков. Взрыв в первом приближении представляет собою адиабатическое расширение газа от объема, который он занимал в магме, до объема, который он займет при атмосферном давлении. При этом температура газа и пепла быстро падает от температуры магмы (1000 °C) до нескольких десятков градусов. Однако этот температурный режим постоянно нарушается в зонах электрических пробоев. В каналах молний длиной в первые километры и шириной 10–390 см в течение примерно 10^{-4} с развивается температура порядка 10^4 °C. К концу разряда она падает до температуры окружающей среды.

Продукты пеплогазовых столбов разносятся на многие десятки (и сотни) километров, что и определяет степень их влияния на экологическую среду. Частицы пепла при взрыве вулкана Кракатау разнесились над Австралией и Европой, будучи причинами эколого-синоптических нарушений. Извержение упомянутого вулкана Тамбора в 1815 г. сопровождалось выбросом огромного количества пыли, которое уменьшило количество падающего на земную поверхность солнечного света. Уменьшение освещенности имело своим следствием понижение температуры. Резкое ухудшение погодных условий повлекло за собой потерю урожая зерновых. Это привело к значительному увеличению цен на зерно в следующие годы на зерновых рынках. Понижение температуры имеет своим следствием также увеличение снегопадов

в зимний период. Падает выживаемость мелких зверьков и, тем самым, становится меньше пищи для более крупных хищников. Именно этим объясняется снижение популяции рыси спустя два сезона после извержения.

Оползни

С деятельностью подземных и поверхностных вод часто связаны разнообразные водно-гравитационные смещения горных пород, развивающиеся на крутых береговых склонах оврагов, долин рек, озер и морей. Среди смещений различаются [36]:

1. Мелкие смещения, захватывающие только поверхностную часть склона, почвенный слой и часть подстилающей выветрившейся породы, которые под влиянием сильного переувлажнения атмосферными осадками начинают медленно передвигаться вниз. Такие смещения называются оплывинами, или сплывами.
2. Крупные смещения земляных масс по склону, захватывающие различные горные породы, слагающие склон и распространяющиеся на большую глубину. Такие смещения называют оползнями.
3. Внезапные обрушения огромных масс горных пород, сопровождающиеся опрокидыванием сорвавшегося массива и его дроблением, называются обвалами. Наиболее значительные проявления их наблюдаются в молодых горных районах. В таких районах вода подготавливает возможность движения пород, ослабляет в них прочность. Часто внезапность обвала бывает связана с проявлением землетрясений. Иногда обвалы достигают грандиозных размеров.

Так в 1911 г. на Памире произошел обвал, при котором обрушилась масса породы в 7–8 млрд т. Возникла естественная плотина высотой свыше 500 м, длиной около 2 км и шириной у основания около 5 км, она запрудила реку Мургаб, и образовалось Сарезское озеро. Его длина около 80 км и глубина около 200 м.

Оползни широко распространены и создают местами угрозу для населенных пунктов, отдельных участков железных дорог и т. п. Крупные оползни вызывают значительные смещения в очертаниях береговых линий. Одним из крупнейших оползневых районов России является Поволжье. Такие города как Нижний Новгород, Васильсурск, Вольск, Саратов, расположенные на

правом берегу Волги, издавна страдают от оползней, и там затрачиваются значительные финансовые средства на выполнение противооползневых мероприятий. Катастрофические оползни в Саратове в 1884 г. привели к разрушению около 300 домов. Почти на всем протяжении Волга подмывает свой правый берег. Эта боковая эрозия создает условия для неустойчивости береговых склонов. Неустойчивость усугубляется тем, что в ряде мест склоны слагаются чередующимися слоями глин и водоносных песков, что способствует проявлению суффозионных процессов, изменению консистенции глинистых пород и т. п.

При разрушении подножия склонов долины рекой образуются эрозионные оползни, при землетрясениях возникают сейсмогенные оползни.

При хозяйственной работе человека в оползневом районе появляются искусственные или антропогенные оползни. Такие оползни встречаются в отдельных местах по долинам рек Днепра, Оки, Печоры, Камы, Москвы. В последнее время отмечается рост числа оползней антропогенного происхождения и расширяется их география.

Борьба с оползнями — дело сложное. В отдельных случаях прибегают к выполаживанию крутого склона путем срезания верхней его части и придания склону более пологого наклона. Иногда строят у основания склона бетонные подпорные стенки, заглубленные в ненарушенные коренные породы, с засыпкой крупного хорошо фильтрующего песчано-гравийного материала между стенкой и склоном. Назначение такой стенки состоит в перехвате и отводе подземных вод, поступающих со склона. При защите берегов, интенсивно подмываемых рекой или морем, устраивают струенаправляющие дамбы, волноломы. Часто применяются дренажные работы, состоящие в перехвате и отводе грунтовых вод, служащих увлажнению склона и созданию условий его оползания. Эти мероприятия сводятся к устройству канав для отвода поверхностных вод и подземных галерей, предназначенных для перехвата и отвода с угрожаемых участков подземных вод.

Список литературы

1. *Акасофу С. И., Чемпен С.* Солнечно-земная физика. М.: Мир, 1974.
2. *Аксенов В. В.* Электромагнитное поле Земли. Новосибирск: Изд-во ИВМ и МГ СО РАН, 2002. 217 с.
3. *Александров С. И., Гамбурцев А. Г., Олейник О. В.* О проведении эколого-медицинского мониторинга в регионах с неблагоприятной средой обитания. М.: Институт физики Земли, 1978. 46 с.
4. *Алексеев В. А., Галин В. Я., Дымников В. П.* и др. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. М.: ИВМ, 1998.
5. *Алексеев В. В.* Физика и экология. М.: Знание, 1978. 46 с.
6. *Алексеев В. В., Чекарев К. В.* Солнечная энергетика. М.: Знание, 1991. 63 с.
7. *Анисимова Е. П., Показеев К. В.* Введение в физику гидросферы. М., изд. физ. ф-та МГУ, 2002. 171 с.
8. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
9. Атмосфера стандартная. Параметры ГОСТ 4401-81. М.: Изд-во стандартов, 1981.
10. *Бауэр Э.* Физика планетных ионосфер. М.: Мир, 1976.
11. *Беттен Л.* Погода в нашей жизни. М.: Мир, 1985.
12. *Блохина Н. С., Орданович А. Е.* Влияние гидрометеорологических условий и поверхностных загрязнений на параметры циркуляций Ленгмюра // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем Севера, 2000. С. 381–392.
13. *Блохина Н. С., Савельева О. С., Орданович А. Е.* Математическое моделирование весеннего термобара // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, Институт водных проблем Севера, 2000. С. 464–472.
14. *Богданов К. Т.* Приливные явления в Тихом океане. М.: Наука, 1994. 144 с.

15. *Богдановский Г. А.* Химическая экология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994.
16. *Ботт М.* Внутреннее строение земли. М.: Мир, 1974. 373 с.
17. *Брезовских Л. М., Гончаров В. В.* Введение в механику сплошных сред (приложение к теории волн). М.: Наука, 1982. 335 с.
18. *Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А.* Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
19. *Будыко М. И., Голицын Г. С., Израэль Ю. А.* Глобальные климатические катастрофы. Л.: Гидрометеиздат, 1986.
20. *Будыко М. И., Рогов А. Б., Янишин А. Л.* История атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
21. *Бялко А. В.* Наша планета Земля. М.: Наука, 1989. 240 с.
22. *Вейсберг Дж.* Погода на Земле. Л.: Гидрометеиздат, 1980.
23. *Вернадский В. И.* Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991, 272 с.
24. *Вернадский В. И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
25. *Вейль П.* Популярная океанография. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 504 с.
26. *Володин Е. М., Дианский Н. А.* Отклик совместной модели ОЦА и О на увеличение содержания углекислого газа // Изв. РАН Сер. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 170-186.
27. *Воробьев В. Н., Смирнов Н. П.* Общая океанология. Ч. II. Динамические процессы. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1999. 230 с.
28. *Вулканы и тектоника литосферных плит / Науч. ред. С. А. Ушаков.* М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. 273 с.
29. *Ганъшин В. А., Борисов А. Г.* Общая экология: Учебное пособие. М.: МГИЭТ (ТУ), 1995. 80 с.
30. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Соловьев Д. М., Станичный С. В.* Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения) // Иссл. Земли из космоса. 2000. № 1. С. 3-14.
31. *Глобальное потепление: Доклад Гринпис / Под ред. Дж. Леггетта.* М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 272 с.
32. *Голдин А.* Оксаны энергии. М.: Знание, 1983. 144 с.
33. *Голицын Г. С.* Введение в динамику планетных атмосфер. Л.: Гидрометеиздат, 1973.
34. *Гордиенко В. А., Гончаренко Б. И.* Особенности метрологического обеспечения измерения уровней инфразвука // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1998. № 4. С. 66-71.
35. *Горшков В. Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 472 с.

36. Горшков Г. П., Якушова А. Ф. Общая геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 593 с.
37. Гульельми А. В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: 1979.
38. Гусев А. М. Основы океанологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 247 с.
39. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Розсков В. А. Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 288 с.
40. Динамические процессы в геосферах: геофизика сильных возмущений. М.: Наука, 1994. 335 с.
41. Дитрих Г., Калле К. Общее мореведение. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 461 с.
42. Довгуша В. В., Тихонов М. Н. Войны 20 века: экологические жертвоприношения // Жизнь и безопасность. 1996. № 4. С. 8–17.
43. Доронин Ю. П. Физика океана. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2000. 340 с.
44. Дрейк Ч., Имбри Дж., Кнаце Дж., Турекиан К. Океан сам по себе и для нас. М.: Прогресс, 1982. 470 с.
45. Дуванин А. И. Приливы в море. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 304 с.
46. Дьяков А. Ф., Морозкина М. В. Проблемы использования энергии волн. М.: Энергоатомиздат, 1993. 176 с.
47. Егоров Н. И. Физическая океанография. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 454 с.
48. Еланский Н. Ф. Международные конвенции по атмосфере и климату и интересы России // Природа. 1999. № 3. С. 3–11.
49. Ерлов Н. Г. Оптика моря. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 247 с.
50. Жадин Е. А. Арктическое колебание и межгодовые вариации температуры поверхности Атлантики и Тихого океана // Метеорология и гидрология. 2001. Т. 8. С. 28–40.
51. Жадин Е. А. Озоновая дыра в Антарктике начинает исчезать? // Экология и промышленность России. Декабрь 2002. С. 27–29. <http://ecip.newmail.ru>.
52. Жадин Е. А. Распространение долгопериодных аномалий зональной циркуляции стратосферы // Метеорология и гидрология. 1996. Т. 7. С. 36–48.
53. Жадин Е. А., Дианский Н. А. Анализ связей межгодовых вариаций общего содержания озона и циркуляции стратосферы // Метеорология и гидрология. 1997. Т. 9. С. 25–33.
54. Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1983. 415 с.
55. Иванов-Холодный Г. С. Ионосфера // Физическая энциклопедия. Т. 2. 1990.

56. *Иванов-Холодный Г. С.* Возможный физический механизм влияния солнечной активности на атмосферу и биосферу // Физическая экология. М., изд. физ. ф-та МГУ, 1998. № 1. С. 9–17.
57. *Иванов-Холодный Г. С., Ивановский А. И.* Атмосфера верхняя // Физическая энциклопедия. Т. 1. 1988.
58. *Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М.* Электричество облаков. Л.: 1971.
59. *Кистович Ю. В., Чашечкин Ю. Д.* Внутренние волны, вязкие пограничные слои и внутренние пограничные течения в непрерывно стратифицированной жидкости // Препринт № 674. М.: Ин-т проблем механики РАН, 2001. 156 с.
60. Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Отв. ред. А. Г. Зацепин, М. В. Флинт. М.: Наука, 2002. 475 с.
61. *Копонкова Г. Е., Показеев К. В.* Динамика морских волн. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 298 с.
62. Концепция перехода РФ к устойчивому развитию // Зеленый мир. 1996. № 12.
63. *Коняев К. В., Сабинин К. Д.* Волны внутри океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 375 с.
64. *Крейман К. Д., Рянжсин С. В.* Моделирование процессов тепло-массопереноса в водоеме и на его водосборе. СПб.: Наука, 1992. 128 с.
65. *Крученицкий Г. М., Бекорюков В. И., Перов С. П.* Проблема изменчивости озонового слоя Земли, климата, УФ-воздействия на биосферу и предлагаемая концепция государственной политики России // Физическая экология. М., изд. физ. ф-та МГУ, 1998. № 1. С. 19–25.
66. *Куликов К. А., Сидоренков Н. С.* Планета Земля. М.: Наука, 1972. 184 с.
67. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д.* Томография ионосферы. М.: Наука, 1991.
68. *Курганский М. В.* Введение в крупномасштабную динамику атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993.
69. *Лавренов И. В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 497 с.
70. *Лазарев А. А., Показеев К. В., Шелковников Н. К.* Физико-химическая неоднородность поверхности океана и поверхностные волны. Ч. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 92 с.
71. *Лазарев А. А., Показеев К. В., Шелковников Н. К.* Физико-химическая неоднородность поверхности океана и поверхностные волны. Ч. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. 112 с.
72. *Лайонс Л., Уильямс Д.* Физика магнитосферы: количественный подход. М.: Мир, 1987.

73. *Ле Блон Н., Майсек Л.* Волны в океане. М.: Мир, 1981. Т 1. 480 с. Т. 2. 365 с.
74. *Мадуро Р. А., Шауэрхаммер Р.* Дыры в озоновой угрозе, или научное свидетельство того, что небо не падает // Зеленый мир. 1997. № 27.
75. *Магницкий В. А.* Внутреннее строение и физика Земли. М.: Недра, 1965. 370 с.
76. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. М.: Недра, 1979.
77. *Малинин В. Н.* Общая океанология. Ч. 1. Физические процессы. СПб.: Изд-во РГГМУ, 1998. 342 с.
78. *Мархинин Е. К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
79. *Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б.* Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеиздат, 1987.
80. *Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. и др.* Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984.
81. *Марчук Г. И., Казан Б. А.* Динамика океанских приливов. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
82. *Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс И.* За пределами роста. М.: Прогресс, 1994. 304 с.
83. Методы и средства борьбы с нефтяным загрязнением вод Мирового океана. Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана / Под. ред. М.П.Нестеровой. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 206 с.
84. *Моисеев Н. Н.* Современный рационализм. М.: МГВП КОКС, 1995. 376 с.
85. *Монин А. С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
86. *Монин А. С., Красицкий В. П.* Явления на поверхности океана. Гидрометеиздат, 1985. 375 с.
87. *Монин А. С., Питербарг Л. И.* Предсказуемость погоды и климата // Пределы предсказуемости / Под ред. Ю. А. Кравцова. М.: ЦентрКом, 1997.
88. *Мохов И. И.* Диагностика структуры климатической системы. СПб.: Гидрометеиздат, 1993.
89. *Мучник В. М.* Физика грозы. Л.: 1974.
90. *Немчинов И. В., Хазинс В. М.* Оценка процессов, протекающих при выбросе метана из подводных гидратных залежей // Физическая экология. М., изд. физ. ф-та МГУ, 1998. № 1. С. 95–99.
91. *Новиков Л. С.* Частицы космического мусора в околоземном пространстве и методы их изучения // Физическая экология. М., изд. физ. ф-та МГУ, 1998. № 2. С. 18–27.

92. *Новиков Л. С., Романовский Ю. А.* Антропогенные воздействия на околоземную среду: концепция, состояние, направление исследований и мониторинга // Физическая экология. М., изд. физ. ф-та МГУ, 1998. № 1. С. 4–12.
93. *Носов М. А.* О возбуждении и цунами в сжимаемом океане вертикальными подвижками дна // Изв. РАН. Сер. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 5. С. 718–726.
94. Обзор загрязнения окружающей природной среды в РФ за 1997 год // Зеленый мир. 1998. № 20.
95. Общая геофизика: Учебное пособие / Под ред. В. А. Магницкого. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 317 с.
96. Окружающая природная среда России. М.: Экос, 1995. 119 с.
97. О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1993 году. М.: Роскомиздат, 1994. 157 с.
98. О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1997 году // Зеленый мир. 1998. № 25–27.
99. *Нелиновский Е. Н.* Гидродинамика волн цунами. Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
100. *Пивоваров А. А.* Термика моря. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 208 с.
101. *Показеев К. В., Анисимова Е. П., Кононкова Г. Е.* Кафедра физики моря и вод суши физического факультета МГУ. М.: Физический факультет МГУ, 2003. 72 с.
102. *Показеев К. В., Медведев А. М.* Основы экологии. М.: 1998. 136 с.
103. *Показеев К. В., Тюриков М. Ю.* Методы расчета ветра и волн в тропических ураганах. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1988. 48 с.
104. *Показеев К. В., Филатов Н. Н.* Гидрофизика и экология озер. Т. 1. Гидрофизика. М.: Физический факультет МГУ, 2002. 276 с.
105. Последствия ядерной войны. М.: Мир, 1998.
106. *Ратклифф Дж.* Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Мир, 1975.
107. *Ревель П., Ревель Ч.* Среда нашего обитания. Кн. 2. Загрязнения воды и воздуха. М.: Мир, 1995. 296 с.
108. *Ревель П., Ревель Ч.* Среда нашего обитания. Кн. 3. Энергетические проблемы человечества. М.: Мир, 1995. 291 с.
109. *Резанов И. А.* Катастрофы в истории Земли. М.: Наука, 1984. 176 с.
110. *Реймерс Н. Ф.* Начала экологических знаний. М.: Изд-во МНЭПУ, 1993. 261 с.
111. *Ришбет Г., Гарриот О. К.* Введение в физику атмосферы. Л.: 1975.
112. *Росс Д.* Энергия волн. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
113. Россия морей. Альманах «Арабески истории». Изд-во ин-та «Ди-Дик», 1997. 573 с.

114. *Роч Ф., Гордон Дж.* Свечение почного песка. М.: 1977.
115. *Рубин А. Б.* Лекции по биофизике. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 160 с.
116. *Самолобов Б. И.* Придонные стратифицированные течения. М.: Научный мир, 1999. 464 с.
117. *Самолобов Б. И., Слусев М. В.* Распространение плотностного потока в Можайском водохранилище // Метеорология и гидрология. 2000. № 4. С. 103–113.
118. *Саркисян А. С., Демин Ю. Л., Брезовских А. Л., Шаланова Т. В.* Методы и результаты расчета циркуляции вод Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 152 с.
119. *Сергеев В. А., Цыганенко Н. А.* Магнитосфера Земли. М.: 1980.
120. *Скурлатов Ю. И.* Введение в экологическую химию. М.: Высшая школа, 1994. 400 с.
121. *Сорохтин О. Г., Ушаков С. А.* Глобальная эволюция Земли. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 446 с.
122. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 236 с.
123. *Стадницкий Г. В., Родионов А. И.* Экология: Учебное пособие для ВУЗов. СПб.: Химия, 1996. 240 с.
124. *Стейси Ф.* Физика Земли. М.: Мир, 1972. 342 с.
125. *Стожков Ю. И., Ермаков В. И., Покровский П. Е.* Роль заряженных частиц в атмосферных процессах // Физические проблемы экологии (физическая экология). Тезисы докладов Второй Всероссийской конференции. М.: 1999. С. 33–34.
126. *Тазиев Г.* Когда земля дрожит. М.: Мир, 1968. 253 с.
127. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
128. *Тимофеев Ю. М., Васильев А. В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003.
129. *Трухин В. И.* Введение в магнетизм горных пород. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 275 с.
130. *Трухин В. И.* Физика твердой Земли // Общая геофизика / Ред. В. А. Магницкий. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. С. 9–104.
131. *Трухин В. И., Жиялева В. А., Зигчук Н. Н., Романов Н. Н.* Магнетизм кимберлитов и трапш. Изд-во Моск. ун-та, 1989. 165 с.
132. *Трухин В. И., Показеев К. В., Куницын В. Е., Шрейдер А. А.* Основы экологической геофизики. М.: Физический факультет МГУ, 2000. 290 с.
133. *Фадеев В. В.* Лазеры в океанологии // Природа. 1978. № 9. С. 54–59.
134. *Фадеев В. В., Доленко С. А., Гердова И. В., Доленко Т. А.* Лазерная флуориметрия смесей сложных органических соединений с

- использованием искусственных нейронных сетей // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 9. С. 834–838.
135. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 296 с.
136. Фельдштейн Я. И. Магнитосфера Земли // Физическая энциклопедия. М.: 1992.
137. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1986.
138. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана / Под ред. В. Н. Каменковича, А. С. Мони́на. М.: Наука, 1978. 455 с.
139. Физика океана. Т. 2. Гидродинамика океана / Под ред. В. Н. Каменковича, А. С. Мони́на. М.: Наука, 1978. 456 с.
140. Физические проблемы экологии (экологическая физика). М.: Физический факультет МГУ, 1999–2003. № 1–11.
141. Филатов Н. Н. Изменение климата Восточной Финляндии и уровня воды крупнейших озер Европы. Петрозаводск: 1997, 148 с.
142. Флигель Р., Бузингер Дж. Введение в физику атмосферы. М.: Мир, 1965.
143. Харгривс Дж. К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
144. Холтон Д. Р. Динамическая метеорология стратосферы. Л.: 1979. 368 с.
145. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.
146. Худолей В. В., Мизгирев И. В. Экологически опасные факторы. Спб., изд. Банка «Петровский», 1996. 186 с.
147. Чалмерс Дж.-А. Атмосферное электричество. Л.: 1974.
148. Чашечкин Ю. Д. Потоки и структуры в стратифицированных океане и атмосфере // Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 4. М., изд. физ. ф-та МГУ, МГУ, 1999. С. 31–40.
149. Чашечкин Ю. Д., Байдулов В. Г., Ильиных Ю. С. и др. Моделирование внутренней структуры и динамики природных систем // Препринт № 592. М.: ИИМ РАН, 1997. 97 с.
150. Чашечкин Ю. Д., Левицкий В. В., Миткин В. В. и др. Лабораторный комплекс для моделирования внутренней структуры и динамики природных систем // Вторая Всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии» (физическая экология). Москва, 18–21 января 1999 г. Тезисы докладов. М.: Физический факультет МГУ, 1999. С. 201.
151. Чашечкин Ю. Д., Попов В. А. Структура свободного конвективного течения над нагретым цилиндром в стратифицированной жидкости // ДАН СССР. 1979. Т. 248. № 5. С. 822–825.

152. Чубаренко И. И. Гидрофизические характеристики барьерной зоны река Преголя–Балтийское море // Физические проблемы экологии (экологическая физика). № 10. М., изд. физ. ф-та МГУ, 2002. С. 179–185.
153. Шокин Ю. И., Чубаров А. Б. Всемирная конференция по уменьшению опасности стихийных бедствий (Иокогама, Япония, 22–28 мая 1994). Отчет участников. Новосибирск: СОРАН, Институт вычислительных технологий, 1989. 79 с.
154. Шокин Ю. И., Чубаров А. Б., Марук Ан. Г., Симонов К. В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1989. 168 с.
155. Шулейкин В. В. Дни прожитые. М.: Наука, 1968. 602 с.
156. Шулейкин В. В. Очерки по физике моря. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 471 с.
157. Шулейкин В. В. Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
158. Экологические проблемы: что происходит, кто виноват и что делать? / Под общ. ред. В. И. Данилова-Данильяна. М.: Изд-во МНЭПУ, 1997. 332 с.
159. Экология, охрана природы, экологическая безопасность / Под ред. А. Т. Никитина, С. А. Степанова. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 648 с.
160. Юман М. Молния. М.: 1972.
161. Якушова А. Ф., Хаин В. Е., Славин В. И. Общая геология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 448 с.
162. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 590 с.
163. Янишин А. И. Парниковая благодать // Поиск. 1996. № 48.
164. Andreeva E. S., Franke S. J., Kunitsyn V. E., Yeh K. C. Some features of the Equatorial Anomaly revealed by Ionospheric Tomography // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. No 16. P. 2465–2468.
165. Christy J. R. et al. Reduce noise in the MSU daily lower tropospheric global temperature data set // J. Climat. 1995. V. 4. P. 888–896.
166. Climate change 1995. Cambridge: Univ. Press, 1996.
167. Hurrell J. W., Trenberth K. E. Spurious trends in satellite MSU temperatures from merging different satellite records // Nature. 1997. 386. P. 164–167.
168. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Franke S. J. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // Geophys. Res. Lett. 2003. V 30. No 16. P. 1851–1854.
169. Luhmann J. // Phys. World. July 2000. P. 31–36.
170. Lui A. T. // Rev. Geophys. 2001. V. 39. No 4. P. 535–563.
171. Our changing planet. USA Global Change Research Program—2000.

-
172. *Merill R. T., McElhinny M. W., McFadden Ph. L.* The magnetic field of the Earth. Academic Press, 1998. 527 p.
 173. NASA/NOAA Ozone hole press release. December 06, 2002.
 174. *Petoukhov V. K., Mokhov I. I., Eliseev A. V.* et al. The IAP RAS Global Climate Model. Moscow: IAP, 1998.
 175. *Schmid M., Lorke A., Dinkel C., Wuest A.* Observation of double diffusive convection in lake Nyos, Cameroon // Proceeding of the 7 Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Petrozavodsk: KSC of RAS, 2003. P. 41–44.
 176. Scientific assessment of ozone depletion: 2002. WMO global ozone research and monitoring project. Report N 47, Geneva: 2003. P. 498.
 177. *Thompson D. W. J., Wallace J. M.* The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 1297–1300.
 178. *Thompson D. W. J., Wallace J. M., Hegerl G. C.* Annular modes in the extratropical circulation. Pt II: Trends // J. Climate. 2000. V. 13. P. 1018–1035.
 179. *Wigley T.* et al. Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations // Nature. 1996. V. 379. N 6562. P. 240.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
Глава 1. Фигура Земли	13
Глава 2. Землетрясения и сейсмология	21
Глава 3. Тепловой режим и возраст Земли	55
Глава 4. Геомагнетизм	60
Глава 5. Литосфера Земли и ее эволюция	97
Глава 6. Вода на Земле	111
Глава 7. Изучение Мирового океана	136
Глава 8. Термодинамика океана	154
Глава 9. Динамика океана	171
Глава 10. Волны в океане	189
Глава 11. Акустика океана	236
Глава 12. Структура и состав атмосферы. Внешние фак- торы	247
Глава 13. Основы термодинамики атмосферы	261
Глава 14. Основы динамики атмосферы. Погода и кли- мат	271
Глава 15. Верхняя атмосфера, ионосфера и ближний космос	286
Глава 16. Электромагнитные явления в атмосфере, рас- пространение электромагнитных волн	308
Глава 17. Основные понятия экологии	323
Глава 18. Глобальный экологический кризис и его моде- ли	377
Глава 19. Загрязнения природной среды	397
Глава 20. Проблема глобального потепления	457
Глава 21. Экологические проблемы энергетики	481
Глава 22. Экологические последствия стихийных бед- ствий	524
Список литературы	560

Учебное издание

ТРУХИН Владимир Ильич
ПОКАЗЕЕВ Константин Васильевич
КУНИЦЫН Вячеслав Евгеньевич

ОБЩАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА

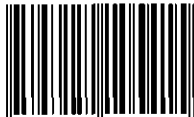
Редактор *Р.А. Бунатян*
Оригинал-макет: *А.М. Широков*

ЛР №071930 от 06.07.99. Подписано в печать 20.12.04.
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 36. Уч.-изд. л. 36,0. Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmilsale@maik.ru;
<http://www.fiml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов в ПФ «Полиграфист»
160001, г. Вологда, ул. Челюскинцев, 3
Тел.: (8172) 72-55-31, 72-61-75, факс: (8172) 72-60-72
E-mail: form.pfp@votel.ru <http://www.vologda/~pfpv>

ISBN 5-9221-0541-8



9 785922 105415