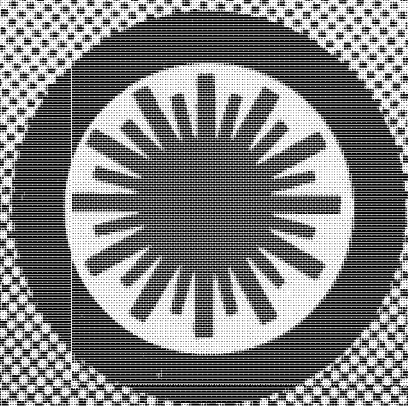


Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов

ИЗДАТ



Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов

ИЗДАТ

МОСКВА

1994

ББК 53.6
Г41
УДК 614.876

Г41 Рыбальченко А. И., Пименов М. К., Костин П. П. и другие
Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. — М.: ИздАТ, 1994, 256 с. Ил.

Впервые освещается более чем 30-летний опыт исследования, создания и осуществления глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в геологические формации на предприятиях и исследовательских центрах России.

Геологическое захоронение радиоактивных отходов в таких масштабах является единственным в мире и сыграло большую роль для предотвращения воздействия радиоактивности на людей в ряде районов страны.

Полученные результаты, освещенные в данной книге, представляют интерес для создания систем захоронения отвержденных радиоактивных отходов, использования недр в целях охраны окружающей среды.

Г $\frac{3604000000-034}{А\ 149(02)-94}$ Без объявл.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Жидкие радиоактивные отходы и способы обращения с ними	16
1.1. Классификация жидких РАО	16
1.2. Развитие технологий обращения с жидкими РАО	26
1.3. Основные требования безопасности при обращении с жидкими РАО	32
Глава 2. Предпосылки использования геологических формаций для захоронения жидких РАО	36
2.1. Вертикальная зональность подземных вод	38
2.2. Коллекторские и изолирующие свойства горных пород	46
2.3. Проявление изолирующих свойств геологической среды при образовании месторождений полезных ископаемых	51
2.4. Естественные преобразования геологической среды и тектоническая активность	57
2.5. Захоронение жидких РАО и добыча полезных ископаемых	65
Глава 3. Исследование и обоснование глубинного захоронения жидких РАО	68
3.1. Концептуальные положения и их реализация	68
3.2. Геолого-разведочные работы	74
3.3. Физико-химические исследования отходов и их взаимодействий с геологической средой	87
3.4. Модели процессов глубинного захоронения	108
3.5. Исследование безопасности и оценка воздействия на окружающую среду	122
Глава 4. Системы глубинного захоронения жидких РАО	144

4.1. Инженерные сооружения полигонов захоронения	147
4.2. Контроль глубинного захоронения	154
4.3. Нормативно-правовая база глубинного захоронения жидких РАО	161
Глава 5. Геологические условия и результаты эксплуатации систем захоронения жидких РАО	167
5.1. Полигоны захоронения жидких РАО Сибирского химического комбината	168
5.2. Полигоны захоронения жидких РАО Горно-химического комбината	197
5.3. Полигоны захоронения жидких РАО Научно-исследовательского института атомных реакторов ...	226
5.4. Основные научно-практические выводы	239
Глава 6. Консервация полигона захоронения жидких РАО	249
Заключение	252
Список литературы	254

ПРЕДИСЛОВИЕ

Глубинное (подземное) захоронение жидких радиоактивных отходов (РАО) осуществляется в течение 30 лет. В глубокозалегающие пласты-коллекторы удалено около 46 млн. куб. м отходов, содержащих более половины радиоактивных нуклидов — продуктов деления урана, образовавшихся как отходы в атомной промышленности России.

Удаление отходов из среды непосредственной деятельности и проживания человека предотвратило отрицательное воздействие радиоактивности отходов на производственный персонал и население в районах 2 оборонных предприятий атомной промышленности и крупного исследовательского центра. Для тысяч людей была существенно снижена степень риска возникновения заболеваний и генетических дефектов, связанных с воздействием радиоактивности, уменьшена вероятность тяжелых аварий при обращении с отходами.

Подземные хранилища (полигоны захоронения) жидких радиоактивных отходов были созданы в сравнительно короткие сроки на основе результатов комплексных исследований и разработок, в проведении которых принимали участие организации различных ведомств, в том числе Академии наук, Министерства геологии, Министерства здравоохранения и др.

Результаты наблюдений и исследований при эксплуатации полигонов захоронения подтвердили эффективность изоляции радиоактивных отходов в глубоких коллекторских горизонтах, правильность принципиальных решений по созданию хранилищ.

Вместе с тем глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов является сегодня одним из дебатруемых вопросов при обсуждении последствий деятельности оборонных предприятий атомной промышленности, в большинстве случаев получает недостаточно объективные и необоснованно негативные оценки со стороны ряда общественных экологических движений, органов массовой информации, законодательных структур, представителей правительственных учреждений. Следствием этого могут быть ошибочные решения по дальнейшей деятельности предприятий, эксплуатации и консервации полигонов, влекущие за собой экономические убытки России и регионов, необоснованные бюджетные затраты, ухудшение состояния окружающей среды и т. д.

Одной из причин подобного положения является отсутствие достаточно полной информации о сущности технологии глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. В связи с этим в настоящей книге рассмотрены причины организации глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов и предпосылки использования для этих целей геологических формаций, практический опыт и результаты исследований эксплуатации хранилищ, оценки безопасности и последствий захоронения.

Содержание и форма изложения материалов книги учитывают те вопросы, которые неоднократно ставились при обсуждении проблем захоронения РАО и охраны окружающей среды представителями общественности, администраций, правительственными органами, народными депутатами. Дать исчерпывающие ответы на подобные вопросы — одна из задач данной книги.

Приведенные в книге результаты эксплуатации систем захоронения и материалы исследований процессов распределения отходов в недрах, изменений пластовых давлений, температуры и т. д. представляют интерес для использования при разработке нефтяных месторождений и месторождений твердых полезных ископаемых способом подземного выщелачивания, охраны недр и т. д.

Опыт создания и эксплуатации подземных хранилищ жидких радиоактивных отходов может быть эффективно использован при глубинном захоронении нерадиоактивных промстоков различных отраслей промышленности, широко применяющемся в США и развивающемся в России.

Переход к технологии отверждения радиоактивных отходов, их хранение и захоронение в слабопроницаемых геологических формациях не снимают проблему жидких радиоактивных отходов, по крайней мере, до 2000—2010 гг. В связи с тем, что проектные емкости пластов-коллекторов действующих хранилищ не исчерпаны, а дальнейшее удаление отходов весьма незначительно повлияет на уже сформированное состояние геологической среды в районах захоронения, действующие хранилища могут быть использованы для захоронения отходов и дезактивирующих растворов, образующихся на завершающих этапах эксплуатации конверсируемых производств, реабилитации территорий и ликвидации последствий деятельности оборонной промышленности.

Книга представляет интерес для геологов, горняков и специалистов по охране окружающей природной среды, а также всех тех, кто по «долгу службы» и по личной инициативе проявляет интерес к вопросам обращения с отходами и использованию для этих целей геологической среды.

*Александру Мешикову
и Льву Прохорову
посвящается*

ВВЕДЕНИЕ

Предупреждение вредного воздействия радиоактивных отходов на человека является одной из актуальных проблем второй половины XX столетия, привлечшей внимание ученых и политиков, широких кругов общественности и населения.

Опасность повышенных уровней радиоактивных излучений, отчетливо проявившаяся после применения США ядерного оружия в 1945 г. и в последующем при работах по производству делящихся материалов, определила особое отношение к атомной энергии и радиоактивным отходам, потребовала принятия кардинальных и оперативных мер по их изоляции от человека.

Особую тревогу вызывали жидкие радиоактивные отходы (далее жидкие РАО), образующиеся в больших количествах и содержащие основную часть радиоактивных нуклидов — продуктов деления урана. Это было обусловлено трудностями локализации сотен тысяч кубических метров ежегодно образующихся отходов, их попаданием в поверхностные водотоки и загрязнением больших территорий.

Сжатые сроки выполнения ядерных программ СССР и США потребовали решения в первую очередь принципиальных технологических вопросов, в связи с чем в конце 40-х — начале 50-х годов обращение с РАО и охрана окружающей среды оказались отодвинутыми на второй план. Определенную роль сыграл и недостаток знаний в то время о всех аспектах поведения радиоактивных нуклидов в окружающей среде.

Обращение с жидкими РАО как с обычными промышленными отходами, применявшееся на начальных этапах деятельности радиохимических предприятий, показало недопустимость такого подхода. Происходило аэрозольное загрязнение территорий, прилегающих к открытым бассейнам и хранилищам жидких РАО, ветровой унос, который при образовании смерчей имел весьма серьезные последствия. В результате фильтрации из поверхностных хранилищ загрязнялись грунтовые

воды, отмечалось загрязнение поверхностных водотоков вплоть до крупных рек на сотни и тысячи километров от предприятий.

Далеко не безопасным было и хранение жидких РАО в специальных емкостях—хранилищах, о чем свидетельствует взрыв поверхностного хранилища и загрязнение обширных площадей на Южном Урале в 1957 г.

Повсеместно в районах радиохимических предприятий отмечалось попадание нуклидов в экологические цепочки, биомиграция нуклидов.

Большую опасность представляют поверхностные хранилища жидких РАО при военном нападении, когда масштабы и уровни загрязнения радиоактивными отходами могут значительно превысить таковые вследствие собственно ядерного взрыва атомных зарядов.

Эти обстоятельства побудили правительства СССР и США с привлечением ученых и специалистов искать пути решения проблемы радиоактивных отходов.

На основе анализа имевших место инцидентов с радиоактивными отходами, консультаций с ведущими специалистами атомной промышленности и учеными Академии наук в СССР были определены три основные направления обращения с радиоактивными отходами: переработка радиоактивных отходов при извлечении нуклидов и других веществ, представляющих интерес для последующего использования в различных целях, перевод отходов в твердую форму (отверждение) и их хранение, захоронение отходов в геологические формации, в том числе в жидком виде, непосредственно после образования отходов.

Обращение к геологическим формациям не было случайным.

Многие виды глубокозалегающих геологических формаций находятся вне сферы активной деятельности человека, не вовлечены в интенсивный круговорот живого вещества, протекающего, в основном, в приграничном слое поверхности Земли и атмосферы. Глубокие геологические формации труднодоступны для случайного или преднамеренного проникновения.

Некоторые геологические формации являются своеобразными «отходами» ранее существовавших природных биосистем. К ним относятся: каменные угли—естественно захороненные и преобразованные остатки древней растительности; нефть, газ, битумы, являющиеся по одной из гипотез также органическими остатками; фосфориты, оолиговые известняки и др.

Образовавшиеся сотни тысяч и миллионы лет назад подобные скопления бывших «отходов» при благоприятных условиях сохранились до настоящего времени, в большинстве случаев не проявляют себя на поверхности и обнаруживаются с большим трудом при целенаправленных поисках.

Образование и захоронение «отходов» сопровождало развитие всех ранес существовавших биосистем. В свою очередь образовавшиеся подобные отходы играли определенную роль в существовании и развитии последующих биологических сообществ. Это явление характерно и для современности — залежи углей, нефти и газа интенсивно используются человеком.

Саморегулирование процессов образования, накопления и утилизации отходов, постоянно осуществлявшееся при естественном развитии и круговороте живой материи, в последующем было нарушено принятием ряда парадигм, в том числе максимального и любой ценой удовлетворения потребностей человека, часто ложно понимаемых и неправильно ранжируемых, а также утверждением всемогущества человека как преобразователя природы. Обе эти парадигмы игнорировали сложность и взаимосвязь естественных природных процессов и условий как единого целого, составной частью которого является человек и общество.

Гонка вооружений, стремление к превосходству или паритету в военной области любой ценой усугубили отрицательные последствия научно-технического прогресса.

Восстановление природного равновесия, нарушенного человеком, в том числе при образовании отходов, является одной из актуальнейших задач современности и ближайшего будущего. И недра, ранее использовавшиеся только для извлечения полезных ископаемых, должны сыграть в этом определенную роль.

Предложения об использовании геологических формаций для захоронения жидких РАО, выдвинутые геологами, радиохимиками, специалистами нефтяной промышленности, в том числе академиками А. П. Виноградовым, В. И. Спициным, проф. С. А. Вознесенским, Н. А. Калининым и др., базировались на имевшихся знаниях и практическом опыте поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа, других полезных ископаемых. Было хорошо известно, что нефтегазовые залежи сохраняются под «покрышками» слабопроницаемых пород в течение сотен тысяч и миллионов лет и иногда при высоких пластовых (аномальных) давлениях, ряд залежей приурочен к зонам тектонических нарушений. Некоторые месторождения металлов, в т. ч. урана (вторичные гидrogenные),

образовались в результате перехода вещества из подземных вод в породы, через которые фильтровались металлоносные растворы, т. е. имела место естественная очистка подземных вод. Относительная стабильность глубокозалегающих геологических формаций во времени, труднодоступность для случайного и преднамеренного проникновения также являлись важными факторами для доводов в пользу глубинного захоронения жидких РАО.

Недра интенсивно использовались для добычи полезных ископаемых, при использовании которых образовались отходы. Возврат в недра этих отходов представлялся вполне логичным.

При разработке нефтяных месторождений широко применялось законтурное и внутриконтурное заводнение, сопровождавшееся нагнетанием значительных объемов вод. В США в 50-х годах получило развитие захоронение (закачка, инъекция) нерадиоактивных промстоков различных отраслей промышленности в глубокие поглощающие горизонты.

При предварительном обсуждении проблемы захоронения жидких РАО было определено, что далеко не все геологические формации удовлетворяют необходимым требованиям, в связи с чем осуществлению захоронения должно предшествовать исследование геологического строения и свойств пород, отходов и их совместимости с геологической средой.

Решением правительства СССР на основании предложений ученых и специалистов во второй половине 50-х годов были начаты геолого-разведочные работы и исследования для обоснования и создания полигонов глубинного (подземного) захоронения жидких РАО для 4-х предприятий атомной промышленности: Сибирского химического комбината (г. Томск-7), Горно-химического комбината (г. Красноярск-26), ПО «Маяк» (г. Челябинск-65), Научно-исследовательского института атомных реакторов (г. Димитровград, Ульяновской обл.).

В связи с увеличивающимся вредным воздействием образующихся радиоактивных отходов на окружающую среду были определены весьма сжатые сроки для создания полигонов захоронения. Вместе с тем глубинное захоронение жидких РАО рассматривалось как временная мера до создания технологий переработки и отверждения отходов, в направлении которых также проводились широкие исследования, но требовавшие значительно большего времени. При этом полагалось, что предварительный перевод отходов в твердые формы с одновременным уменьшением физического объема даст большую свободу в выборе окончательного способа обращения с отходами: хранение на поверхности, захоронение в глубокие

слабопроницаемые формации, отправка в космос, последующая повторная переработка и т. д.

Вместе с тем было выяснено, что важным фактором, от которого зависит выбор способа обращения с жидкими отходами, является их объем. Если для отходов медицинских учреждений и небольших исследовательских центров переработка отходов и их отверждение осуществляются достаточно эффективно, то для крупных радиохимических предприятий, характеризующихся объемами образующихся отходов от нескольких сотен до тысяч куб. м в сутки, эта задача превращалась в серьезную, сложно решаемую проблему.

Выполненный анализ возможностей реализации рассмотренных технологий обращения с РАО показал, что технология их захоронения в жидком виде в коллекторские горизонты может быть реализована значительно раньше, чем отверждение или глубокая переработка. Это был важный довод в пользу глубинного захоронения жидких РАО, поскольку накопление их на поверхности представляло большую потенциальную опасность. В последующем это предположение подтвердилось. Технология отверждения начала внедряться значительно позже, глубокая переработка отходов (схема «Д») так и не была реализована.

Работы по захоронению жидких РАО в целом соответствовали рекомендациям МАГАТЭ, периодически обсуждавшимся со второй половины 50-х годов [1].

Попытки создания полигонов захоронения жидких РАО предпринимались в США, где уже несколько десятилетий применялось захоронение (инъекция) промстоков химической, фармацевтической и других отраслей промышленности. Однако выполненный анализ показал, что основные предприятия атомной промышленности США расположены в районах, геологические условия которых неблагоприятны для глубинного захоронения жидких отходов [2].

Тем не менее захоронения жидких РАО и пульп исследовательского центра в слабопроницаемые породы осуществлялось в Ок-Ридже [3]. На национальной станции испытания реакторов в Айдахо захоронение низкоактивных отходов через скважины осуществлялось в сравнительно неблагоприятных геологических условиях в толщу трещиноватых пород, однако в последующем было прекращено в связи со значительными масштабами миграции [4]. Проводилось нагнетание промстоков ураноперерабатывающего предприятия фирмы «Анаконда» в штате Нью-Мексико.

Впервые в СССР геолого-разведочные работы с целью обоснования глубинного захоронения жидких РАО были начаты

в середине 50-х годов в районе Сибирского химического комбината (СХК) Новосибирским территориальным геологическим управлением и включали геофизические сейсмо- и электро-разведочные работы, геологическую съемку, бурение скважин, опытно-фильтрационные исследования. В последующем работы были переданы в специализированную организацию: Всесоюзный гидрогеологический трест, переименованный во Второе Гидрогеологическое управление Министерства геологии, ныне ГГП Гидроспецгеология. Руководство работами осуществлялось К. И. Антоненко, М. Я. Даниловичем, Е. Г. Чаповским и позднее Ю. С. Татарчуком. Физико-химические исследования отходов и их совместимости с геологической средой, а также разработка технологии подготовки отходов к захоронению осуществлялись Институтом Физической Химии АН под руководством академика В. И. Спицина, В. Д. Балукowej. В институте ВНИПИ—промтехнологии (ранее Промниипроект) под руководством Е. Д. Мальцева, Ф. П. Юдина, М. К. Пименова проводились научно-технические, технико-экономические и опытно-конструкторские проработки, обоснование безопасности, моделирование условий захоронения, проектирование инженерных систем. Позднее к проектированию поверхностных сооружений был привлечен Институт ВНИПИЭТ, работы в котором осуществлялись под руководством М. В. Страхова. Вопросы санитарно-гигиенических оценок при обосновании и создании полигонов глубинного захоронения жидких РАО решались Институтом Биофизики и Третьим медицинским управлением Минздрава под руководством А. С. Белицкого и А. И. Рыжова.

В последующем в конце 50-х годов геолого-разведочные работы и исследования были организованы в районе Горно-химического комбината (ГХК), Научно-исследовательского института атомных реакторов (НИИАР), ПО «Маяк». В соответствии с полученными материалами организациями Министерства геологии был сделан вывод о принципиальной возможности захоронения жидких РАО в районе СХК, ГХК и НИИАР, обоснованы исходные данные для проектирования. Район ПО «Маяк» оказался по геологическим условиям неблагоприятным для глубинного захоронения жидких РАО, в последующем ближайший участок, удовлетворяющий необходимым требованиям, был разведан в 150 км от предприятия в пределах Курганской обл. Решения о создании там полигона не было принято.

Осложняющим обстоятельством при обосновании полигонов захоронения жидких РАО СХК и ГХК являлось наличие пресных вод, содержащихся в коллекторских горизонтах, при-

годных для удаления в них отходов. По мнению ученых и специалистов, для захоронения отходов предпочтительнее использовать горизонты соленых вод. Однако учитывая отсутствие в тот период времени альтернативных технологий обращения с отходами и большую их потенциальную опасность, необходимость размещения участков захоронения вблизи предприятий, а также незначительные естественные запасы пресных подземных вод, выводимых из возможного использования в связи с захоронением, был сделан вывод о возможности использования выделенных горизонтов для захоронения жидких РАО.

В соответствии с согласованной и утвержденной проектной документацией был создан экспериментальный полигон захоронения технологических отходов СХК, введенный в 1963 г., затем хранилище пл. 18 и пл. 18а СХК, введенные в эксплуатацию в 1967 г. и в 1975 г. Хранилища жидких РАО ГХК были введены в эксплуатацию в 1967—69 гг., НИИАР в 1966—73 гг.

Захоронение жидких РАО сопровождалось систематическими наблюдениями с использованием сети контрольных скважин и специальными исследованиями, результаты которых представляют самостоятельный интерес.

Большое значение для успешного решения важной и сложной проблемы глубинного захоронения жидких РАО имел самоотверженный труд организаций Министерства геологии и, прежде всего, ГГП Гидроспецгеология. Среди них в первую очередь могут быть названы: Б. Н. Саввин, К. И. Антоненко, М. М. Поляков, А. А. Гончаров, И. И. Тищенко, А. В. Носухин, А. Т. Ларченко, Б. Я. Лебедев, В. Т. Рыженков, Г. П. Попсуй-Шапко, специалисты геологических служб предприятий: М. Н. Баранов, В. П. Салопов, Л. Ф. Новоселов, Б. П. Сигаев, И. А. Лачков, Т. Н. Носукина, В. М. Овчинников, И. Н. Поводайло, Р. В. Першина, А. В. Митрюшин, А. С. Ладзин, И. П. Улюшкин.

Проблема глубинного захоронения жидких РАО не могла быть решена и без плодотворного труда ученых и проектантов институтов Министерства среднего машиностроения и Академии наук. Большой вклад внесли помимо составителей данной книги Ф. П. Юдин, А. Н. Калинин, Э. Н. Мунаев, В. Г. Панасюк, Д. И. Левицкий, Ю. И. Абрамов, Г. А. Окуньков, Г. П. Вахурина, А. А. Меняйло, Е. В. Захарова, А. М. Рыков, М. Л. Медведева.

Все работы выполнялись при поддержке руководителей предприятий и Министерства: А. Г. Мешкова, Е. И. Микерина,

А. Д. Зверева, Н. И. Грекова, Н. Н. Егорова, А. Р. Белова, О. Д. Казачковского, С. И. Зайцева, Н. С. Осипова, А. И. Карелина, Л. М. Хасанова и др. Большую помощь оказывали работники подразделений Министерства: Б. С. Колычев, З. В. Чаусов, А. Н. Тыманюк, Н. А. Раков.

Результаты исследований глубинного захоронения жидких РАО представляют интерес для решения других задач использования недр в хозяйственных целях, поэтому материалы соответствующих разделов книги составлены с учетом возможности их последующего применения.

В связи с высокой токсичностью жидких РАО и ответственностью принимаемых решений многие вопросы захоронения отходов были весьма тщательно исследованы и проработаны. Выполненные проработки представляют несомненный интерес для захоронения нерадиоактивных отходов. Первый специализированный межведомственный нормативный документ по глубинному захоронению был разработан применительно к жидким РАО и до настоящего времени применяется для других категорий промстоков (5).

Обращение с радиоактивными отходами относится к числу наиболее дебатированных проблем, весьма нередки субъективные оценки ранее принятых решений, искажения действительности, что оказывает отрицательное влияние на выбор оптимального развития атомной энергетики, максимального использования потенциала атомной промышленности для стабилизации экономики России и обеспечения ее обороноспособности. Поэтому одной из целей настоящей книги является показ результатов исследования и практических работ, в форме, доступной для широкого круга читателей.

Основой для подготовки настоящей книги послужили результаты геолого-разведочных, исследовательских и практических работ по созданию и эксплуатации систем захоронения на 2 крупных предприятиях атомной промышленности и в одном исследовательском центре. Краткое освещение получили работы на предприятиях, где после проведения исследовательских и проектных работ полигоны по тем или иным причинам созданы не были.

В книге главное внимание было уделено обоснованности принятых решений по глубинному захоронению жидких РАО и его безопасности, некоторым результатам проведенных исследований и практическому опыту эксплуатации систем захо-

ронения. Ввиду этого ряд вопросов получил краткое освещение. К этим вопросам следует отнести ряд положений теории массопереноса в проницаемых и слабопроницаемых горизонтах, неравновесности происходящих в них физико-химических процессов и ряд других. Дальнейшие исследования в этих направлениях не повлияют на принципиальные оценки безопасности захоронения жидких РАО, однако будут представлять интерес для геологов теоретиков и практиков.

Обширный накопленный материал глубинного захоронения жидких РАО еще ждет своих исследователей.

1. ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И СПОСОБЫ ОБРАЩЕНИЯ С НИМИ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ РАО

Под жидкими РАО понимают растворы, содержащие радиоактивные нуклиды, которые по технико-экономическим или иным соображениям не могут быть использованы для получения товарной продукции или в других хозяйственных целях.

Жидкие РАО характеризуются большим разнообразием составов, химических и физических свойств, зависящих от места и условий их образования и обращения перед направлением их на захоронение. Суммарная активность и радионуклидный состав представлены, в основном, продуктами деления урана. Помимо радиоактивных нуклидов в состав жидких РАО входят соли, ионы металлов, кислоты, щелочи, детергенты, органические соединения и т. д., а также твердые вещества в виде мелкодисперсных взвесей, золь и гелей.

В качестве нижнего предела содержаний радиоактивных нуклидов, выше которых отходы считаются радиоактивными, обычно принимаются значения допустимых концентраций радиоактивных нуклидов в питьевых водах (ДКБ) в соответствии с нормами радиационной безопасности [6]. При оценке токсичности РАО, находящихся в геологических формациях, в качестве предела, ниже которого отходы считаются не опасными, рядом исследователей предлагается принимать уровни, устанавливаемые исходя из содержаний естественных изотопов урана, тория, калия в горных породах или подземных водах, а также изменчивости этих содержаний [7].

Отходы обычно разделяются по уровню удельной активности (числу актов радиоактивного распада в единицу времени в единице количества вещества) на низко — (слабо) активные, среднеактивные, высокоактивные. Как показывает практика, такая классификация, особенно для жидких отходов, не является однозначной, поскольку уровень активности далеко не в полной степени определяет биологическую опасность или

токсичность отходов, т. е. основное их свойство с точки зрения выбора способов обращения, и особенно хранения и захоронения. Например, среднеактивные отходы, содержащие долгоживущие трансурановые нуклиды и продукты деления (стронций-90 и цезий-137), будут более опасны в процессе долговременной изоляции, чем высокоактивные отходы, содержащие только продукты деления с малым периодом полураспада (церий-144, прометий-147, рутений-106, -103, цирконий и ниобий-95, тритий). В связи с этим в различных странах диапазоны удельной активности, определяющие принадлежность отходов к той или иной категории, значительно различаются, применяются также дополнительные категории [8].

В качестве критериев классификации применяются также периоды полураспада радиоактивных нуклидов и вид излучения, удельное тепловыделение, условия образования отходов и способы обращения с ними.

Впервые попытка разработки единой системы классификации жидких РАО была предпринята МАГАТЭ в 1970 г. [9]. В соответствии с этой классификацией низкоактивные отходы включали 3 подкатегории с активностью, соответственно, $<10^{-6}$ Ки/м³, от 10^{-6} до 10^{-3} и $10^{-3} - 10^{-1}$ Ки/м³, среднеактивные отходы — с активностью $0,1 - 10^4$ Ки/м³ и высокоактивные — с активностью более 10^4 Ки/м³. Во многих странах применяются национальные системы классификации радиоактивных, в том числе жидких, отходов, учитывающие уровень развития и особенности применяемых ядерных технологий, технико-экономические, социальные и природные условия.

В соответствии с действующими в Российской Федерации Нормами радиационной безопасности и санитарными правилами (НРБ 76/87, ОСП 72/87, СПОРО-85) [6, 10] жидкие РАО подразделяются на слабоактивные $<10^{-5}$ Ки/л, среднеактивные $10^{-5} - 1$ Ки/л и высокоактивные >1 Ки/л. На практике вместо термина слабоактивные чаще применяют термин низкоактивные отходы.

В некоторых научно-технических материалах, например в книге А. С. Никифорова, В. В. Куличенко, М. И. Жихарева «Обезвреживание жидких радиоактивных отходов», М., ЭАИ, 1985 г., к высокоактивным отходам предлагается относить растворы, при хранении которых требуется охлаждение [11].

В США применялась двумерная система классификации радиоактивных отходов, в которой одним критерием является

уровень активности отходов, определяемый, в основном, концентрацией продуктов деления, являющихся основными источниками выделения тепла и внешнего ионизирующего излучения, и другим критерием — концентрация радиоактивных нуклидов с очень большими периодами полураспада, главным образом альфа-излучающих нуклидов, определяющих необходимость долговременной изоляции отходов [8].

Выделяются три основных категории радиоактивных отходов: высокоактивные, альфа-излучающие трансурановые (TRU) отходы, низкоактивные отходы. Высокоактивные отходы имеют высокий уровень радиоактивности, высокое тепловыделение, что требует в процессе обращения с ними применения специальных мер для ограничения «кратковременного» риска. Высокоактивные отходы могут содержать нуклиды с очень большими периодами полураспада, что требует и долговременной изоляции.

Трансурановые отходы или эквивалентные им отходы с повышенными концентрациями долгоживущих нуклидов (углерод-14, технеций-99, иод-129 и т. д.) определяются как отходы, требующие долговременной изоляции, но не являются собственно высокоактивными (отходы долговременной изоляции).

В основу количественного определения критерия «высокий уровень активности» в США были положены уровни тепловыделения 50 Вт/м^3 или мощность внешнего ионизирующего излучения более 1 Зв./ч на расстоянии 1 м от отходов. Для каждого радионуклида установлены граничные концентрации, соответствующие критерию «высокий уровень активности». Например, для стронция-90 граничная концентрация принята 7000 Ки/м^3 , для цезия-137 — 5000 Ки/м^3 , плутония-239 — 2000 Ки/м^3 и т. д. Для отходов, содержащих смесь нуклидов, устанавливается граничная концентрация по правилу суммы долей.

Установлены граничные концентрации нуклидов в отходах по критерию «требуют долговременной изоляции». Например, для стронция-90 и цезия-137 граничные концентрации те же, что и для высокоактивных отходов, а для плутония-239 граничная концентрация составляет $0,1 \text{ Ки/м}^3$.

В Великобритании применяется система классификации, в которой выделяются 5 категорий отходов в зависимости от удельной активности, вида излучений и периода полураспада нуклидов. К высокоактивным относятся отходы заметно генерирующие тепло [8].

Во Франции радиоактивные отходы делятся на 3 категории [8]:

А — отходы низкого и среднего уровня активности, содержащие нуклиды с периодом полураспада менее 30 лет при максимальной активности долгоживущих альфа-излучающих нуклидов 3.7 ГБк (0,1 Ки/т);

В — отходы низкого и среднего уровней активности, содержащие значительные количества долгоживущих альфа-излучающих нуклидов;

С — высокоактивные отходы, содержащие долгоживущие нуклиды и нуклиды с высоким уровнем излучений.

В Италии применяются также 3 категории классификации отходов по времени распада содержащихся в них нуклидов до естественных уровней.

Характерным для всех национальных классификаций является отличие граничных значений активности для сходных категорий отходов.

Заслуживает внимания классификация РАО, учитывающая варианты их окончательного удаления и предложенная МАГАТЭ в 1982—84 гг. [8, 12, 13]. РАО подразделяются на пять категорий, причем предусматриваются две категории среднеактивных и две категории низкоактивных отходов: с короткоживущими и долгоживущими нуклидами, и одна категория высокоактивных нуклидов (табл. 1.1). Характерно, что для разграничения категорий отходов не используются количественные характеристики, как, например, в действующей классификации НРБ 76/87.

Т а б л и ц а 1.1

Категория радиоактивных отходов с точки зрения выбора концепции их окончательного удаления

Категории отходов	Основные характеристики	Вид отходов, относящихся к данной категории
1	2	3
I. Высокоактивные с долгоживущими радионуклидами	Высокий уровень β - и γ -активности Значительное α -излучение Высокая радиотоксичность Высокое тепловыделение	Высокоактивные отходы от переработки облученного топлива и переработанное облученное топливо для топливных циклов с однократным использованием топлива

Категории отходов	Основные характеристики	Вид отходов, относящихся к данной категории
1	2	3
II. Среднеактивные с долгоживущими радионуклидами	Средний уровень β - и γ -активности Значительное α -излучение Средняя радиотоксичность Низкое тепловыделение	α -отходы, образующиеся в процессе переработки облученного топлива, изготовления смешанного оксидного топлива, а также в процессе эксплуатации предприятий военного назначения, связанных с получением и использованием плутония
III. Низкоактивные с долгоживущими радионуклидами	Низкий уровень β - и γ -активности Значительное α -излучение Низкая и средняя радиотоксичность Незначительное* тепловыделение	
IV. Среднеактивные с короткоживущими радионуклидами	Средний уровень β - и γ -активности Незначительное* α -излучение Средняя радиотоксичность	Отходы от эксплуатации, технического обслуживания и снятия АЭС с эксплуатации; отходы, образующиеся на начальных стадиях ЯЭТЦ (аффинаж, конверсия, изготовление топлива); а также — на предприятиях по изготовлению и использованию радиоизотопов в медицине, научно-исследовательских и учебных институтах, промышленности и других областях
V. Низкоактивные с короткоживущими радионуклидами	Низкий уровень β - и γ -активности Незначительное* α -излучение Низкая радиотоксичность Незначительное* тепловыделение	

* Эта характеристика может не приниматься во внимание при решении вопроса об окончательном удалении данной категории отходов.

В таблице 1.2, также предложенной МАГАТЭ, приведены варианты окончательного удаления РАО различных категорий. Для IV и V категорий (средне- и низкоактивные отходы с короткоживущими нуклидами) допускается их захоронение в жидком виде (инъекция) в глубокие проницаемые формации и в виде твердеющих пульп в слабопроницаемые горные породы.

Использование в качестве основного классифицирующего признака длительности распада нуклида при рассмотрении вопросов захоронения РАО является вполне оправданным, поскольку требования к технологии захоронения, геологическим формациям, глубине и месту захоронения во многом определяются периодом времени, в течение которого отходы будут сохранять токсичность.

Применительно к практике захоронения жидких РАО на предприятиях атомной промышленности России могут быть дополнительно рассмотрены две категории «высокоактивных отходов»: с короткоживущими и долгоживущими нуклидами. Это предложение исходит из того обстоятельства, что принятая классификация в соответствии с действующими нормами [6, 10] далеко не в полной мере отражает опасность отходов, особенно при рассмотрении их состояния в геологической формации в течение длительных периодов времени. Например, высокоактивные отходы, т. е. с активностью более 1 Ки/л, содержащие короткоживущие нуклиды типа трития, рутения, церия-144 и др. с периодом полураспада 1 - 2 года, существенно отличаются потенциальной опасностью и требуют иного обращения, чем отходы такой же активности, но содержащие долгоживущие трансурановые нуклиды с периодом полураспада сотни, тысячи и более лет, в том числе изотопы плутония, америция, кюрия, нептуния и др. Если первый тип высокоактивных отходов через несколько лет или десятков лет (в зависимости от начальной активности) может перейти в разряд средне-, а затем и низкоактивных отходов, то отходы второго типа будут оставаться высокоактивными в течение длительных периодов времени.

В соответствии с требованиями нормативных документов и сложившейся практикой на действующих полигонах России осуществляется глубинное захоронение жидких РАО, содержащих минимальное количество долгоживущих трансурановых нуклидов, верхний предел которых устанавливается исходя из условий обеспечения безопасности и технико-экономических возможностей их извлечения. Содержание этих нуклидов в подготовленных к глубинному захоронению жидких РАО существенно меньше установленных в США в качестве граничных для отнесения к долгоживущим (TRU) отходам.

Суммарное содержание нуклидов — продуктов деления урана со средним и малым периодом полураспада в направляемых на глубинное захоронение некоторых категорий жидких РАО также ниже граничных значений для отнесения к высокоактивным РАО в соответствии с классификацией США.

Таблица 1.2

Варианты окончательного удаления радиоактивных отходов

Варианты окончательного удаления радиоактивных отходов	Среда	Категории отходов (табл. 1.1)				
		I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6	7
1. Размещение в глубоких геологических формациях* ¹	Сухая* ²	Отвержденные, упакованные, размещенные с учетом выделения тепла радиоактивного распада	Отвержденные, упакованные		Применимо, однако для данных категорий отходов не требуется такой высокой степени изоляции* ³	
	Влажная* ⁴	То же	То же			
2. Размещение в шахтах или полостях* ⁵	Сухая	Возможно с применением дополнительных технических барьеров	Возможно, в зависимости от обстоятельств		Отвержденные, могут быть упакованы	
	Влажная	Не рекомендуется			Отвержденные, упакованные	
3. Размещение в приповерхностных слоях	Сухая	Не рекомендуется			Отвержденные, упакованные	Отвержденные, могут быть упакованы
	Влажная	Не рекомендуется			Отвержденные, упакованные; с применением дополнительных технических барьеров	Отвержденные или упакованные; с применением дополнительных технических барьеров

4. Инжекция самоотвердевающих пульп радиоактивных отходов в разрывы, образованные в пластах геологических формаций с низкой проницаемостью	Не рекомендуется	Осуществимо с соответствующей проверкой (демонстрацией) технологии и только для определенных типов радионуклидов	Применимо при наличии соответствующей технологии
5. Инжекция жидких отходов в глубокие, проницаемые формации	Не рекомендуется	» »	» »

*¹ Хранилища, сооружаемые специально для окончательного удаления радиоактивных отходов. *² Геологическая окружающая среда, естественным образом изолированная от проникновения грунтовых вод. *³ Предпочтительны для стран с неблагоприятными геологическими характеристиками приповерхностных слоев. *⁴ Геологическая окружающая среда, через которую возможно проникновение грунтовых вод. *⁵ Шахты или полости, образованные естественным путем или в результате добычи минерального сырья или сооруженные специально для окончательного удаления радиоактивных отходов.

В то же время по классификации нормативных документов, действующих в России, эти категории отходов должны быть отнесены к высокоактивным.

Применяемые классификации жидких РАО, направляемых на глубинное захоронение, учитывают происхождение отходов, химический и радиохимический состав, периодичность поступления, технологию подготовки, обеспечивающую совместимость с пластовой водой и породами пласта-коллектора. Отходы подразделяются на технологические и нетехнологические.

К технологическим отходам относятся растворы, образующиеся непосредственно при переработке облученного топлива, в том числе при его растворении, после операций извлечения урана, плутония, нептуния, америция. Технологические отходы подразделяются на высоко- и среднеактивные (САО и ВАО) по уровню содержащихся в них радиоактивных нуклидов.

К нетехнологическим отходам относятся растворы, образующиеся при вспомогательных процессах: воды спецпрачечных, растворы после дезактивации оборудования, протечки и трапные воды, растворы, образующиеся при исследовательских работах, регенераты ионообменных установок, используемых при очистке отходов, конденсаты и т. д. Нетехнологические отходы являются обычно низкоактивными (НАО), однако могут быть среднеактивными.

По составу радионуклидов, входящих в состав отходов, нет четкого деления для каждой категории отходов. Радионуклидный состав представлен изотопами стронция, рутения, цезия, церия, прометия и рядом других.

Могут быть выделены отходы, содержащие трансплутониевые элементы: изотопы америция, кюрия, калифорния и др., а также нептуний (реэстракт ТПЭ). Такие отходы на глубинное захоронение в жидком виде не направляются.

Особенностью отходов, направляемых на захоронение в жидком виде, является преобладание в их составе радиоактивных нуклидов с малыми периодами распада. Например, на долю нуклидов с периодами полураспада до 2 лет или несколько более (изотопы рутения, стронций-89, цезий-134, церий-144, прометей-147, цирконий- и ниобий-95), в САО и НАО приходится ~50% общей активности и в ВАО — до 70%. Остальную часть составляют нуклиды со средним периодом полураспада, в основном стронций-90 и цезий-137.

При подготовке жидких РАО к захоронению обычно осуществляется доизвлечение долгоживущих нуклидов — в том числе урана, изотопов плутония и трансплутониевых элементов. Ввиду этого долгоживущие нуклиды содержатся в захора-

ниваемых отходах в неизвлекаемых концентрациях и по активности составляют сотые и тысячные доли процента.

По основным показателям химического состава жидкие РАО, направляемые на захоронение, подразделяются на кислые ($pH\ 1\div3$) и щелочные ($pH\ 8-9$), высокосолесодержащие (до 300 г/л) и с низким солесодержанием (1—10 г/л). Выделяются отходы с преобладанием какого-либо соединения, например алюминатные САО, образующиеся при растворении внешних оболочек стандартных урановых блоков облученного топлива [14, 15], марганцево-ниобиевые пульпы и т. д.

По режимам поступления жидких РАО на захоронение выделяются поступающие ограниченными порциями периодически в течение небольших промежутков времени и поступающие практически непрерывно или в течение длительных периодов времени. Например, опытное захоронение технологических отходов в кислой среде (условно относимых к высокоактивным) осуществляется периодически порциями от нескольких сотен до 2—3 тысяч куб. м. САО и НАО удаляются практически постоянно или этапами длительностью несколько месяцев с перерывами между этапами для проведения ремонтных и профилактических работ. Перед направлением на захоронение осуществляется подготовка жидких РАО, в связи с чем их характеристики могут отличаться от таковых для отходов, образующихся непосредственно в технологическом процессе.

В таблице 1.3 приведена общая характеристика жидких РАО по опубликованным материалам [14, 15].

Т а б л и ц а 1.3

Общая характеристика жидких РАО, поступающих на захоронение

Категория	Режим поступления	Общая удельная активность, Кя/л	Основной хим. состав
1	2	3	4
Технологические: щелочные среднеактивные (САО) — кислые условно относимые к высокоактивным (ВАО)	Непрерывный Периодический	$10^{-6}-1$ $0.1-10$	Нитрат натрия, алюминат натрия, едкий натр Нитрат натрия, продукты коррозии комплексообразующие реагенты, $pH\ 1\div3$
Нетехнологические низкоактивные (НАО)	Непрерывный	$10^{-8}-10^{-6}$	Нитрат натрия, сульфат натрия, карбонаты кальция, магния, моющие средства, $pH\ 8\div10$

1.2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАО

При становлении атомной промышленности в конце сороковых — начале пятидесятих годов обращение с образующимися радиоактивными отходами мало отличалось от принятых в других отраслях промышленности — в основном в металлургической и химической. Всё внимание было обращено на скорейшее и в необходимых количествах получение оружейных плутония и урана. Жидкие отходы на первых этапах работы предприятий сбрасывались в существующие водоемы и водотоки, хранились в специальных сооружениях. Реальная угроза третьей мировой войны и стремление достижения военного превосходства или хотя бы паритета как средства устрашения возможного агрессора и гарантия военной безопасности затмевали потенциальную опасность образующихся радиоактивных отходов, которая возрастала в квадрате или даже в кубе по мере их накопления.

На первенце советской атомной промышленности ПО «Маяк» в Челябинской обл. жидкие РАО первоначально сбрасывались в реку Теча. В 1949—56 гг. было сброшено 2,7 млн. Ки. В последующем отходы стали направляться в существующие водоемы, в том числе в озеро-болото Карачай. Высокоактивные отходы направлялись в специальные емкости-хранилища из нержавеющей стали (16).

На Сибирском химическом комбинате были созданы бассейны-хранилища № 1, 2 для хранения среднеактивных отходов, комплекс емкостей для хранения высокоактивных отходов, пульпохранилища № 1, 2 низкоактивных отходов. Использовались также естественные водоемы — водохранилища № 3 и 4. Были осуществлены строительство и ввод в эксплуатацию мощного цеха очистных сооружений — пл. 13, включавшего переработку НАО путем осаждения взвесей, фильтрования, технологические схемы ионного обмена и возврата очищенных вод для повторного использования.

Вторичные «отходы» очистных сооружений — регенераты, маточные растворы, пульпы направлялись в поверхностные хранилища, а очищенные до кондиций питьевых по радионуклидам воды направлялись для повторного использования или сбрасывались в водотоки.

Аналогичные сооружения, но меньше по объему, создавались на Горно-химическом комбинате. Переработка стоков, в основном низкоактивных, осуществлялась в цехе очистных сооружений, в последующем выделившемся в объект переработки стоков. Средне- и высокоактивные отходы хранились в специальных емкостях.

На предприятиях атомной промышленности США применялись подобные способы обращения с отходами, однако вместо создания поверхностных открытых хранилищ жидких отходов было более распространено хранение в резервуарах различного типа, как надземных, так и заглубленных, сброс в неглубокозалегающие грунты через поглощающие траншеи, отстойники, колодцы (крыбы) [17].

Очень скоро выяснилось, что такое обращение с отходами приводит к весьма неприятным последствиям: радиоактивное загрязнение приземных слоев атмосферы непосредственно в районе предприятий, например ПО «Маяк», было на 90% обусловлено аэрозольным уносом с водной поверхности водоемов и береговой черты, сдувками из емкостей-хранилищ [16]. Загрязнение водотоков, в том числе и за пределами промзоны предприятий, обуславливало формирование дозовых нагрузок на население вследствие внешнего облучения и орального поступления нуклидов с загрязненной сельскохозяйственной продукцией, рыбой, грибами и т. д.

В 1957 г. произошел взрыв витратно-ацетатных солей в емкости для хранения высокоактивных отходов ПО «Маяк», повлекший выброс 20 млн. Ки радиоактивных нуклидов и загрязнение около 20 тыс. кв. км территории. Позже имел место ветровой унос 600 Ки с береговой черты оз. Карачай и загрязнение 1,8 тыс. кв. км [16]. Эти события показали необходимость особого отношения к радиоактивным отходам, побудили руководство страны и промышленности принять срочные меры по предупреждению вредного воздействия отходов на людей, окружающую природную среду. Еще раньше при рассмотрении проблем атомной промышленности было сформировано мнение о необходимости сбора образующихся РАО, их концентрирования, извлечения урана, плутония и других трансурановых элементов, перевода в твердые устойчивые формы, хранения и захоронения. Были начаты исследовательские работы. Однако когда возникла острая необходимость решения практических задач применительно к жидким РАО крупных радиохимических предприятий, выполненные проработки показали, что создание технологий глубокой переработки отходов, а затем строительство соответствующих сооружений, разработка и изготовление оборудования требуют значительных средств и, самое главное, времени, в течение которого продолжалось бы загрязнение окружающей среды и воздействие отходов на население.

Анализ экологической ситуации и возможности потенциальных аварий показал, что значительной опасности подвергается район Сибирского химического комбината, расположенного

всего лишь в 25 км от г. Томска. Аварии, подобные произошедшим на Урале, могли бы привести к более тяжелым последствиям для населения одного из крупнейших городов Сибири. Большую опасность представляли отходы в случае возникновения войны и воздушного нападения.

По предложению Правительства СССР были проведены поиски альтернативных технологий и предложено использовать для размещения (захоронения) жидких РАО глубокозалегающие пласты-коллекторы, аналогичные вмещающим нефть и газ, но не содержащим последних.

Как показано в последующих разделах данной книги, это решение было в то время правильным и позволило предупредить отрицательное влияние жидких РАО на персонал предприятий и людей, проживающих в районе Сибирского химического комбината (г. Томск-7), Горно-химического комбината (г. Красноярск-26), Научно-исследовательского института атомных реакторов (г. Димитровград). Решение о создании полигонов глубинного захоронения жидких РАО и начало успешной их эксплуатации не повлияли на темпы проведения исследований в других направлениях обезвреживания РАО, тем более, что крупнейшее предприятие атомной промышленности ПО «Маяк» на Урале не могло прибегнуть к этой технологии из-за неблагоприятных геологических условий, не позволивших осуществить глубинное захоронение жидких РАО. Исследования технологий переработки и отверждения жидких РАО интенсивно продолжались, однако практические результаты были получены значительно позже, что было обусловлено рядом объективных, не рассматриваемых здесь причин. Аналогичная ситуация складывалась и за рубежом.

К настоящему времени сформировались взгляды на решение проблемы промышленных, в том числе радиоактивных отходов, суть которых может быть представлена в виде следующих положений:

при реализации любой технологии количество образующихся отходов должно быть минимизировано, а форма отходов должна быть наименее подвижной;

— образующиеся отходы и содержащиеся в них компоненты должны максимально использоваться в различных целях;

— отходы, не находящие применения, концентрируются, перерабатываются с целью придания им наименее токсичной и наиболее устойчивой формы и хранятся, пока их использование не станет возможным;

— токсичные отходы, представляющие значительную опасность для человека и окружающей среды при их накопле-

нии, переработке, использовании и хранении, размещаются в специальных труднодоступных охраняемых сооружениях или захораниваются в геологических формациях с соответствующей предварительной переработкой. Очевидно, что использование самых современных технологий переработки жидких отходов не исключает применения глубинного захоронения для некоторых категорий из них.

Последовательное претворение в жизнь указанных положений далеко не всегда возможно в связи с трудностями, а иногда и принципиальной невозможностью преодоления противоречий между императивом получения товарной продукции с минимальной себестоимостью и обеспечения максимальных прибылей, с одной стороны, и необходимостью затрат, иногда весьма значительных, на предупреждение вредного воздействия образующихся отходов на окружающую среду.

Затраты на защиту окружающей среды и обращение с отходами иногда бывают столь высоки, что в условиях рыночных отношений производимая продукция по своей стоимости оказывается неконкурентноспособной и отсутствие прибылей обуславливает свертывание производства.

В связи с этим в большинстве случаев применяются компромиссные решения, обеспечивающие рентабельность промышленного производства и достаточную защиту человека и окружающей среды, приемлемые способы обращения с отходами, хотя и не обеспечивающие полное их обезвреживание.

К наибольшим компромиссам приходится прибегать при обеспечении функционирования жизненно важных производств, например оборонной и пищевой промышленности, энергетики, транспорта. В этих условиях весьма важно найти такое оптимальное сочетание способов обращения с отходами, которые хотя и не отвечают требованиям полного исключения влияния вредных факторов, но обеспечивают их минимальное воздействие ниже порога возникновения необратимых эффектов.

Выбор способа или сочетания способов обращения с жидкими РАО определяется не только их химическими и физическими характеристиками, но и объемами отходов, которые должны быть переработаны. Если для небольших исследовательских центров и производств с объемами образующихся низко- и среднеактивных отходов до 10—20 куб. м в сутки не представляет существенных трудностей переработать и утилизировать отходы, то для крупных промышленных производств с объемами жидких РАО до нескольких сотен и тысяч куб. м в сутки создание технологических схем переработки отходов превращается в сложную задачу, которая не всегда может

быть решена. Для высокоактивных отходов существенные трудности вызывают переработка и отверждение объемов даже в несколько куб. м. в сутки.

Разработанные и применяющиеся технологии переработки жидких РАО не обеспечивают их полного обезвреживания, а лишь позволяют уменьшить объемы и перевести в более устойчивую форму (т. е. заключить их в стекло, бетон, битум и др.). При этом образуются «вторичные» отходы, требующие специального обращения. Обслуживание технологических систем требует сложных мер по защите людей от облучения.

Традиционными способами обращения с низко- и среднеактивными жидкими РАО являются химическое осаждение, ионный обмен, выпаривание, фильтрование, мембранные методы, битумирование, остеклование и т. д.

Очистка отходов от радиоактивности при использовании способов осаждения происходит за счет собственно осаждения, а также соосаждения и адсорбции нуклидов на образующихся объемных осадках в системе отходы — осадитель, а также за счет физического захвата осадками суспензированных коллоидных частиц. Используются различные химические реагенты: гидроксиды железа, алюминия, титана, фосфаты, сульфаты и сульфиды, ферроцианиды меди, цинка, никеля и т. д. В результате образуются жидкая и твердая фазы. Степень очистки жидкой фазы характеризуется значениями 50—100 и более. Твердая фаза обогащена нуклидами. Жидкая фаза может подвергаться дополнительной очистке, после чего направляется для повторного использования или сбрасывается в окружающую среду. Твердая фаза должна перерабатываться и направляться на хранение или захоронение. Осаждение применяется главным образом для низко- и среднеактивных отходов.

Очистка жидких РАО по ионнообменной технологии осуществляется с использованием неорганических природных и синтетических материалов, органических материалов. К неорганическим природным материалам относятся глины, природные цеолиты, минералы: вермикулит, клиноптилолит и др. Органические ионнообменные материалы представляют собой смолы, в их основу входят главным образом полистирол и фенолформальдегид, в которые вводятся функциональные группы. Ионнообменные смолы позволяют обеспечить высокую степень очистки вод от радионуклидов ($10^2 \div 10^4$), однако предъявляют жесткие требования к подаваемым стокам: содержание до 1 г/л, суспензированные твердые взвеси до 4 мг/л, что обуславливает необходимость предварительной подготовки стоков. Вторичными отходами ионнообменных

установок являются растворы, полученные при промывке смол (регенерирующие растворы), содержащие значительные количества нуклидов и солей и отработанные ионнообменные материалы, которые требуют дальнейшей переработки, хранения или захоронения.

Выпаривание является широко распространенным методом переработки отходов, достигаемая степень очистки в среднем составляет 10^4 , а в некоторых схемах достигает 10^6 . В связи с коррозией выпарных аппаратов, пенообразованием, образованием накипи отходы должны проходить предварительную подготовку. Вторичными отходами являются кубовые остатки — растворы и пульпы с высоким содержанием нуклидов и солей. Часть нуклидов может оставаться в конденсате, что требует организации многостадийного процесса выпаривания. Выпаривание является весьма энергоемким процессом, что снижает эффективность его использования для переработки больших объемов отходов.

Фильтрование обычно используется в качестве вспомогательного процесса для подготовки жидких РАО к переработке различными методами. Применяются различные системы фильтров, центрифуги, гидроциклоны. Образующийся фильтровальный материал требует дальнейшей переработки.

К мембранным процессам относятся обратный осмос, электродиализ и ультрафильтрация, которые применяются, в основном, для низкоактивных отходов. В стадии разработки находятся электроосмос, электрохимический ионный обмен и др. Во всех этих процессах также получают вторичные отходы, требующие специального обращения.

Завершающей стадией рассмотренных технологий является отверждение отходов, и прежде всего высокоактивных, являющихся наиболее опасными. Наибольшее развитие находит остекловывание высокоактивных отходов — с получением боросиликатных, фосфатных, базальтовых, содоизвестковых и других типов стекол. В некоторых процессах предварительно осуществляется дегидратация и кальцинация жидких отходов.

Процессы остекловывания осуществляются при высоких температурах, сопровождаются газоаэрозольными выбросами, что требует особых мер предосторожности.

Применяется цементирование высоко- и среднеактивных отходов с использованием специальных смесей на основе портландцемента. В стадии исследований находится получение минералоподобных, керамических и металлокерамических композиций. Битумирование применяется для низко- и среднеактивных отходов. Горючесть битумов является отрицательной характеристикой данной технологии.

Как следует из общей характеристики технологий переработки отходов, все они являются весьма сложными, требуют специального аппаратного оформления в антикоррозионном исполнении, достаточно энергоемки, их обслуживание сопряжено с определенной опасностью для персонала; эксплуатация технологических комплексов не исключает возникновения аварийных ситуаций и загрязнения окружающей среды [18]. После переработки образуются вторичные отходы или концентраты, требующие хранения и захоронения.

Способом прямого обезвреживания РАО является трансмутация радиоактивных нуклидов с использованием ядерных реакторов и аналогичных физических установок. Долгоживущие нуклиды переводятся в короткоживущие, которые распадаются за сравнительно небольшие промежутки времени. Технология трансмутации находится в стадии исследований и разработок.

Глубинное захоронение жидких РАО непосредственно после их образования снимает ряд сложностей подобного характера, требует существенно меньших затрат, носящих непроеводительный характер. В период 50–80-х годов глубинное захоронение являлось единственной реальной технологией для некоторых типов отходов.

1.3. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ЖИДКИМИ РАО

Требования безопасности при обращении с жидкими РАО базируются на основополагающих документах Научного комитета по действию атомной радиации при ООН (НКДАР), Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), рекомендациях МАГАТЭ, национальных нормативных материалах—Нормах радиационной безопасности НРБ-76/87 [6, 19, 20, 21].

Основной целью является обеспечение защиты от ионизирующего излучения отдельных лиц, их потомства и человечества в целом и в то же время создание соответствующих условий для необходимой практической деятельности человека, во время которой люди могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений. МКРЗ и другими международными организациями признается гипотеза линейного беспорогового воздействия излучения, которое может суммироваться с влиянием на человека химических загрязнений, присутствующих в окружающей среде. В связи с этим, наряду с установлением дозовых пределов, гарантирующих определенную степень без-

опасности, рекомендуется снижать дозовые нагрузки на население и работников предприятий до минимальных уровней.

В рекомендациях МКРЗ основные принципы регламентирования дозовых нагрузок изложены следующим образом [19]:

- никакой вид использования ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если оно не приносит реальной чистой пользы;

- все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов;

- эквивалентная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендуемого нормативными материалами для соответствующих условий.

Действующие Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 также содержат в качестве основополагающих подобные требования:

- непревышение установленного основного дозового предела;

- исключение всякого необоснованного облучения;

- снижение дозы излучения до возможно низкого уровня.

Выполнение этих требований применительно к обращению с радиоактивными отходами имеет свои особенности. Отходы представляют собой вещества и материалы, непригодные для дальнейшего использования. Поэтому вполне оправданной является тенденция избавиться от отходов как можно скорее после их образования, при минимальном отрицательном воздействии их на человека и минимальных затратах. Радикальным решением подобной задачи является отправка РАО за пределы солнечной системы или в сторону солнца с использованием ракетно-космической техники или превращение компонентов РАО в нерадиоактивные (трансмутация). Однако до реализации подобных технологий в промышленных масштабах еще весьма далеко.

Следующим возможным способом обращения с РАО являются их локализация и изоляция в специальных сооружениях или в соответствующих природных объектах, при размещении в которых отходы не воздействовали бы на людей. Необходимо учитывать, что промежуточные операции с отходами по их кондиционированию, переработке, очистке и т. д. связаны с облучением работников предприятий и в определенной степени населения за счет вентиляционных выбросов. Уровни облучения могут быть обеспечены ниже установленных пределов, однако исходя из беспороговой концепции они являются нежелательными. Глубинное захоронение жидких РАО, обычно осуществляемое сразу после образования отходов и при

минимуме операций по их подготовке, в этом плане имеет определенные преимущества.

При рассмотрении вопросов захоронения РАО учитываются возможные долговременные последствия, в частности отношение последующих поколений людей к местам захоронения, необходимость проведения ими дополнительных работ, связанных с отходами.

В материале МАГАТЭ «Принципы безопасности и технические критерии для подземного удаления высокоактивных отходов» [21] содержатся следующие рекомендации: будущие поколения людей должны нести минимальное бремя забот о захороненных высокоактивных отходах с учетом технических, социальных и экономических факторов. Обеспечение безопасности хранилища высокоактивных отходов после его консервации и истечения заданного периода времени не должно основываться на каких-либо активных действиях по контролю и обслуживанию хранилища. Степень изоляции высокоактивных отходов должна быть такой, чтобы риск воздействия на человека в будущем был бы не выше риска, приемлемого на сегодняшний день. Обращается внимание на необходимость предупреждения трансграничных эффектов, когда хранилище отходов оказывает влияние на сопредельные страны или при изменении границ может оказаться в другой стране, подтверждается требование минимально возможного облучения людей и непревышение предельных уровней доз и риска, приводится ряд технических критериев, в том числе требование перевода высокоактивных отходов перед захоронением в твердую форму.

Как показано в последующих разделах книги, глубинное захоронение РАО в жидком виде в той или иной степени удовлетворяет требованиям последнего документа. Исключение составляет условие предварительного перевода высокоактивных отходов в твердую форму, однако, как следует из приведенных в разделе 1.1 классификаций РАО и материалов главы 5, высокоактивные отходы, которые могут быть направлены на захоронение в виде растворов, по ряду характеристик занимают промежуточное положение между высоко- и среднеактивными, причем ближе к последним.

Таким образом, основной целью различных способов обращения с РАО является предупреждение какого-либо воздействия отходов на человека. Анализ имеющихся нормативных и методических материалов, научно-технических публикаций позволяет сформулировать следующие общие требования к окончательным стадиям обращения с РАО:

— отходы должны быть изолированы от среды проживания и непосредственной деятельности человека, обитания животных и развития растительности;

— место хранения или захоронения отходов должно быть труднодоступно для случайного или преднамеренного проникновения; отходы не должны подвергаться воздействию природных катастрофических явлений, способных извлечь отходы из хранилища;

— границы сооружений, территории или геологической среды (недр), в которых находятся отходы, должны быть четко определены и устанавливаться с учетом возможных природных явлений. В пределах границ хранения или захоронения не допускается или ограничивается деятельность, не связанная с отходами;

— изоляция отходов в пределах установленных границ должна обеспечиваться в течение необходимого времени, пока нуклиды или другие компоненты будут представлять опасность для человека и окружающей среды, или в течение реально-прогнозируемого периода времени;

— для уменьшения облучения персонала и населения должны быть сведены до минимума предварительные операции по подготовке, переработке, транспортированию отходов, сопровождающиеся поступлением радиоактивности в окружающую среду, воздействием излучений;

— при хранении РАО или после их захоронения в объеме хранилища не должны развиваться процессы, ухудшающие условия изоляции отходов и приводящие к выходу компонентов отходов за пределы хранилища, требующие проведения специальных работ по хранению или перезахоронению отходов;

— места хранения или захоронения РАО должны занимать минимально возможные площади и объемы, оказывать минимальное влияние на природные ресурсы и различные виды деятельности по их использованию на сопредельных территориях.

Более конкретные требования к обращению с РАО целесообразно устанавливать исходя из состава и свойств рассматриваемых отходов, существующих научно-технических, социально-экономических, гигиенических и экологических факторов, исторических традиций и т. д. В составе этих требований могут быть условия хранения и захоронения в твердом или жидком виде тех или других типов отходов, количественные характеристики, конструкции оборудования и т. д. Эти требования могут рассматриваться в национальных нормативно-технических документах, разрабатываемых для конкретных

периодов времени, с учетом технико-экономических возможностей реализации и т. д.

Сведения о нормативно-технической базе способов захоронения жидких РАО приведены в гл. 4.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФОРМАЦИЙ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

Размещение в недрах жидких РАО, как, впрочем, и других веществ и объектов, способных оказывать вредное воздействие на человека, является логическим продолжением тысячелетней деятельности общества по использованию природных ресурсов недр для удовлетворения своих насущных потребностей, среди которых одно из важных мест занимает защита от вредных факторов окружающей среды и последствий деятельности самого общества.

Недра являются традиционным источником полезных ископаемых, разнообразие которых и объемы добычи, глубины проникновения с этой целью человека в недра постоянно увеличиваются. В конце 80-х — начале 90-х годов из недр в мире ежегодно извлекалось около 4000 млн. тонн угля, 900 млн. тонн железных руд, 2000 млн. тонн нефти и 2000 млрд. куб. м газа. Недра интенсивно используются для водоснабжения и получения минеральных вод.

Переработка извлекаемых масс горных пород и флюидов с целью получения необходимых веществ, материалов и энергоносителей, их дальнейшее использование приводит к образованию различных отходов, в том числе радиоактивных, возврат которых в недра, наряду с другими способами обращения с отходами, представляется вполне естественным.

На современном этапе промышленного развития усиливается значение недр не только как источника минерального сырья, но и среды размещения различных сооружений и технологических комплексов, строительство которых на поверхности по ряду причин нежелательно или связано с отрицательным воздействием на среду непосредственного обитания, требует особой защиты от внешнего воздействия. К таким сооружениям могут быть отнесены транспортные коммуникации, различные хранилища, в т. ч. отходов, резервуары, подземные АЭС и другие.

Интенсивное использование недр для добычи полезных ископаемых, их исследование в связи с поисками, разведкой и разработкой месторождений, изучение земной коры позволили к настоящему времени сформировать обширную систему знаний о строении, свойствах и закономерностях изменения геологической среды, создать научно-методическую базу решения ответственных задач, связанных с использованием недр в различных целях.

Анализ накопленных геологических знаний и практического опыта горной и, прежде всего, нефтедобывающей промышленности дает основания утверждать о принципиальной возможности и технической осуществимости размещения (захоронения) жидких РАО в глубоких горизонтах земной коры, удовлетворяющих определенным требованиям.

Основанием для такого вывода, в первую очередь, являются следующие известные факты и закономерности:

- изолированность глубоких водоносных горизонтов и комплексов от поверхности, вертикальная гидродинамическая и гидрогеохимическая зональность подземных вод, низкая интенсивность массопереноса в подземных водах;

- широко распространенная «пустотность» горных пород, представленная сообщающимися порами и трещинами. Благодаря этому они вмещают подземные воды, нефть и газ, а также принудительно нагнетаемые растворы различных веществ;

- образование и сохранение нефтегазовых залежей, месторождений полезных ископаемых, в том числе урана, в результате накопления химических соединений и радиоактивных веществ породами из фильтрующихся через их поровое пространство вод;

- стабильность земной коры, труднодоступность глубокозалегающих формаций для случайного или преднамеренного проникновения.

Вместе с тем оппонентами использования геологической среды для глубинного захоронения жидких РАО и вообще промстоков высказываются иные точки зрения, которые, в основном, базируются на следующих положениях:

- земная кора, и особенно водонасыщенные ее зоны, в той или иной степени проницаема, в том числе благодаря глубинным тектоническим нарушениям разломного характера. Известны области развития карста, где скорости и объемы перемещения водных масс весьма велики;

- естественные изменения земной коры сопровождаются землетрясениями и могут влиять на условия изолированности глубоких геологических формаций;

- подземные воды используются для водоснабжения, осуществляется добыча бальнеологических и промышленных вод.

Захоронение жидких РАО и промстоков уменьшит естественные запасы подземных вод, которые в будущем могли бы найти применение.

Очевидно, что эти противоречия могут быть преодолены проведением продуманной и научно обоснованной политики пользования недрами, в том числе выбором для создания хранилищ геологических формаций определенного типа, строения и обладающих необходимыми свойствами, предварительным исследованием геологических формаций в месте предполагаемого захоронения отходов, совместимости отходов с породами и подземными водами, прогнозированием процессов захоронения и изменений геологической среды и принятием на этой основе взвешенных инженерных решений.

Ниже приведено рассмотрение предпосылок использования геологических формаций для глубинного захоронения жидких РАО с учетом высказываемых оппонентами точек зрения.

2.1. ВЕРТИКАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Проблема глубинного захоронения как жидких, так и твердых РАО не может решаться без учета строения и свойств верхних частей земной коры – литосферы и подземной гидросферы, находящейся в пределах литосферы и объединяющей всю совокупность подземных вод Земли ниже поверхности и дна водоемов и водотоков. Подземные воды, находящиеся в свободном или связанном состоянии, в той или иной степени могут контактировать с захороненными РАО и изменять их, вызывать миграцию компонентов РАО из мест захоронения.

Большую роль играют подземные воды при захоронении жидких РАО в коллекторские горизонты, поскольку от конкретных гидродинамических и гидрогеохимических условий зависят принципиальная возможность захоронения и его безопасность, размеры области влияния захоронения и, соответственно, горного отвода недр, технология подготовки отходов к захоронению, схема хранилища и т. д. Захоронение жидких РАО неизбежно связано с взаимодействием отходов с подземными водами и воздействием на них, поскольку удаление РАО осуществляется в естественные пустоты – поровое пространство коллекторских пород, содержащих пластовую воду.

Объем воды в подземной гидросфере сравнительно невелик и составляет около 0,63% от общего количества воды в гидросфере Земли, оцениваемого в 1360 миллионов куб. км. Больше всего воды содержит мировой океан – 97,2%, полярные шапки и ледники – 2,15%, пресноводные и соленые озера, внутренние

моря — 0,017%; атмосфера — 0,001%; вадозные воды, включая почвенную влагу, — 0,005%; русла рек — 0,001%; [22]. Запасы пресной воды на Земле составляют несколько больше 30 млн. км³, причем примерно 97% из них сосредоточено в полярных шапках и ледниках, около 2% приходится на воды атмосферы, пресных озер, рек, почвенную влагу и около 1% на подземные пресные воды. Минерализованные воды составляют 70—80% от всего объема воды подземной гидросферы.

Распределение воды в гидросфере, ее состав, физические и химические свойства, скорость перемещения и водообмена между атмосферой, наземной и подземной гидросферой в значительной степени зависят от местоположения воды в той или иной оболочке Земли, строения и свойств включающих воду природных образований. Если для атмосферы и поверхностных вод время водообмена между ними может составлять от нескольких часов и суток, а водные массы в атмосфере и реках способны перемещаться на большие расстояния в короткие промежутки времени, то для глубоких водоносных горизонтов высокоминерализованных вод (рассолов) скорости естественного движения подземных вод обычно характеризуются значениями сантиметров и метров в год, могут иметь разнонаправленный характер, неоднократно изменяющийся в течение геологических эпох. Водообмен подобных водоносных горизонтов с поверхностными или неглубокозалегающими подземными водами практически отсутствует.

В основе идеи глубинного захоронения жидких РАО лежит использование таких участков геологической среды, которые благодаря естественным условиям обеспечат локализацию отходов в месте их захоронения, несмотря на присутствие подземных, преимущественно соленых вод, естественное движение которых незначительно.

Характерной особенностью подземной гидросферы является гидродинамическая и гидрогеохимическая зональность, выражающаяся в изменении с глубиной напорного режима подземных вод (гидростатического и геостатического сжатия), их химического состава, состава растворенных газов и т. д. Вертикальная зональность подземных вод отчетливо проявляется в платформенных областях (Русская платформа, Западно-Сибирская плита и др.) и является отражением условий формирования и строения многокилометровых толщ осадочных пород, геологический разрез которых сложен горизонтально или моноклинально залегающими и чередующимися слоями проницаемых пород (пески, песчаники, известняки) и слабопроницаемых пород (глины, аргиллиты, соли), обладающих водоупорными свойствами.

В соответствии с принятой в гидрогеологии классификацией в толще осадочных водонасыщенных пород выделяются следующие составляющие элементы:

Водоносный слой (пласт) — слой проницаемых пород, характеризующийся однородностью литолого-фациального состава, фильтрационных и емкостных свойств. Пустоты (поры или трещины) пород водоносного слоя содержат воду, способную перемещаться под воздействием гравитационных сил или градиентов давления.

Водоносный горизонт — один или несколько водоносных слоев, характеризующихся общностью условий формирования и движения подземных вод. Водоносный горизонт обладает гидродинамической самостоятельностью, которая проявляется в тесной взаимосвязи напора во всех слоях.

Водоносный комплекс — это несколько водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми или водоупорными породами и обладающих общностью ресурсов и состава подземных вод. Входящие в состав комплекса горизонты могут быть гидродинамическими связаны, хотя напоры их могут отличаться.

Водоупор или слабопроницаемый слой (горизонт) сложен породами с низкими фильтрационными свойствами, вода в которых находится преимущественно в связанном состоянии, а размеры пор настолько малы, что капиллярные силы затрудняют ее движение. Водоупорные свойства глинистых пород или их способность препятствовать фильтрации жидкости зависят от конкретных условий, в том числе температуры и солесодержания поровой жидкости. К водоупорным породам относятся также залежи соли, гипсов и ангидритов.

Водоупорный комплекс — это переслаивание нескольких водоупорных слоев или горизонтов с водоносными слоями небольшой мощности. Водоупорный комплекс обычно представляет собой региональный водоупор, изолирующий друг от друга выше- и нижележащие водоносные комплексы (горизонты).

Наличие в геологическом разрезе водоупорных комплексов является обязательным условием для глубинного захоронения жидких РАО. Слоистость отложений комплекса, наличие в его составе слоев пород различной пластичности, в том числе проницаемых, обеспечивают сохранение им водоупорных свойств при изменении гидростатического давления вследствие захоронения жидких РАО в нижележащие водоносные горизонты.

Для характеристики процессов перемещения подземных вод в водоносных горизонтах и комплексах применяются следующие понятия:

- действительная скорость потока — средняя (результатирующая) скорость перемещения молекул воды в порах по направлению потока в проекции на плоскость, примерно параллельную кровле (верхней границе) или подошве (нижней границе) водоносного слоя или горизонта;

- время водообмена — время, необходимое для смены всего первоначального объема воды в поровом пространстве горизонта на равный новый объем воды;

- возраст подземных вод — отрезок времени от попадания воды в горизонт до текущего момента времени.

Воды глубоких горизонтов, которые могут использоваться для захоронения жидких РАО, находятся под напором. Уровень таких подземных вод в скважинах, вскрывающих горизонт, устанавливается значительно выше кровли горизонта. Возникновение напора обусловлено гидростатическим и геостатическим давлением, фильтрационным сопротивлением пористых пород движущимся в них подземным водам, развитием тектонических напряжений в земной коре. Естественно, что для формирования напорного режима необходимо наличие в разрезе водоупорных горизонтов и комплексов, препятствующих перераспределению подземных вод по вертикали.

Пресные воды, залегающие на глубинах первых десятков метров и тесно связанные с поверхностными, с увеличением глубины приобретают напорный характер, сменяются слабосолеными водами, имеющими затрудненную связь с поверхностными. Ниже, обычно на глубинах более 1000 м, залегают соленые воды (рассолы). В анионном составе вод верхней части разреза преобладают гидрокарбонаты, глубже отмечается появление сульфатов, а еще глубже преобладают хлориды. Аналогична смена и катионного состава, хотя и менее выражена: в верхних горизонтах преобладают кальций и магний, а в наиболее глубоких — натрий и кальций. Наблюдаются определенные закономерности поведения с глубиной различных компонентов, находящихся в микроконцентрациях: содержания железа, марганца, кремнезема, бария, многих металлов с глубиной уменьшаются, содержания брома, калия, стронция, радия с глубиной увеличиваются. Значения окислительно-восстановительного потенциала с глубиной уменьшаются, исчезает кислород, в водах накапливаются азот, метан, сероводород, углекислый газ, тяжелые углеводороды. Залежи нефти и газа, возникающие в глубоких водоносных комплексах, при определенных условиях способны сохраняться в течении миллионов лет.

Исследования режима и состава подземных вод мощных толщ осадочных пород, опыт разведки и разработки нефтегазовых месторождений, месторождений пресных и иодо-бромных вод дали основания геологам выделить этажно расположенные гидродинамические и газогидрохимические зоны, различающиеся по режиму и происхождению подземных вод, их составу, природе энергетического потенциала, проявляющегося в формировании напора, движении подземных вод (рис. 1).

Известны различные классификации зон подземных вод, предложенные Н. К. Игнатовичем, Н. А. Гатальским, Ю. В. Мухиным, Г. Ю. Валуконисом, Г. В. Богомоловым, Н. К. Зайцевым и др., использующих различные классифицирующие признаки [23]. В обобщенном виде выделяются зоны свободного (активного) водообмена, затрудненного водообмена и застойного режима (весьма затрудненного водообмена).

Зона свободного водообмена занимает верхние части разреза до глубин первых сотен метров (зона аэрации, грунтовые воды, межпластовые безнапорные и пластовые напорные воды). Природа энергетического потенциала гидростатическая, генезис (происхождение) вод инфильтрационный: воды поступают в систему за счет инфильтрации осадков в области питания, затем перемещаются по слоям и горизонтам в направлении области разгрузки. Напор (гидростатическое давление) в напорных горизонтах развивается в результате различия высотных отметок области питания и области разгрузки, фильтрационного сопротивления пород движущимся водам, геостатической нагрузки. С точки зрения захоронения промстоков, интерес представляют нижние горизонты зоны, скорость движения вод в которых характеризуется значениями не более нескольких метров в год, время водообмена и возраст подземных вод оценивается тысячами и десятками тысячами лет.

Зона затрудненного водообмена — промежуточная между зоной свободного водообмена и застойного режима, залегает в большинстве случаев на глубинах от нескольких сотен до тысячи-полутора тысяч метров. В пределах зоны воды движутся от областей инфильтрации к погруженным частям бассейна со скоростями от единиц сантиметров до нескольких метров в год. Природа энергетического потенциала — гидростатическая. В формировании ресурсов подземных вод наряду с водами инфильтрационного генезиса верхней зоны определенную роль играют и седиментационные воды (захороненные воды «захвата»), оказавшиеся в поровом пространстве пород при их образовании в бассейнах осадконакоп-

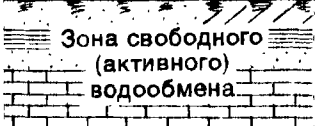


Наименование зоны	Характерные глубины залегания	Характеристики подземных вод и их происхождение	Природа энергетического потенциала и характер движения вод	Время полного водообмена, лет	Характерные скорости движения вод	Возможность захоронения промстоков
 <p>Зона свободного (активного) водообмена</p>	Первые сотни до тысячи метров	Пресные инфильтрационные воды, в нижней части минерализованные	Гидростатический, движение от области питания до области разгрузки	От первых десятков и сотен до тысячи	От единиц до десятков м/год	В исключительных случаях в нижней части
 <p>Зона затрудненного водообмена</p>	От первых сотен до 1,5—2 тыс. м	Минерализованные в верхней части древние инфильтрационные, ниже седиментационные и элизионные	Гидростатический, движение от областей питания к погруженным частям бассейна	Тысячи и десятки тысяч лет	От долей до первых метров в год	Возможно при благоприятных условиях
 <p>Зона замедленного водообмена (застойного режима)</p>	От 1,5—2 до 3—5 тыс. м и глубже	Высокоминерализованные, преимущественно седиментационные и элизионные	Тектоногидравлический и геостатический, движение определяется развитием тектонических напряжений, характеризуется изменением направления во времени	Миллионы лет	Сантиметры в год	Возможно при благоприятных условиях

Рис. 1. Вертикальная зональность подземных вод

* Примечание. для 2 нижних зон рассматривается водообмен с выше- и нижезалегающей зоной.

ления (древних морях и озерах) и прошедшие с породами стадии естественных изменений — литогенеза. В нижних частях зоны появляются элизионные воды — отжатые из пластичных выше- и нижезалегающих пород под воздействием геостатической нагрузки — веса толщи пород. Возраст подземных вод близок или несколько меньше возраста пород и может колебаться от сотен тысяч до десятков миллионов лет. Водообмен может происходить преимущественно между нижними горизонтами зоны свободного водообмена и горизонтами зоны затрудненного водообмена, и внутри зоны. Для захоронения жидких отходов могут использоваться проницаемые горизонты практически всей зоны.

Зона застойного режима занимает нижние части осадочного чехла и залегает на глубинах от полутора до двух тысяч метров и более. Природа энергетического потенциала — геостатическая и тектоническая. Напоры подземных вод в значительной степени определяются геостатическим давлением и тектоническими напряжениями, изменения которых в результате естественного развития земной коры обуславливает перемещение подземных вод, носящее тектоногидравлический характер. Скорость движения — сантиметры в год, направление движения может неоднократно меняться в течение геологических эпох. Воды содержат большое количество солей и обычно представляют собой рассолы, являются седиментационными. В нижних частях зоны увеличивается доля элизионных вод и вод, образовавшихся при гидратации глинистых минералов. Эти явления приводят к образованию инверсии — когда ниже рассолов, отделенные от них водоупорными слоями, залегают воды с меньшим солесодержанием. Существование зон инверсии — залегание менее солесодержащих и, соответственно, менее плотных вод под более плотными является свидетельством хороших изолирующих свойств слабопроницаемых слоев глубоких горизонтов.

Возраст подземных вод близок к возрасту вмещающих пород, т. е. оценивается временем десятков, сотен и тысяч миллионов лет. Водообмен происходит в основном между горизонтами и водоносными комплексами самой зоны, а также с водами трещиноватых зон нижезалегающего фундамента (кристаллического основания) в результате проявлений современных тектонических движений и формированием областей опускания, поднятия, сжатия, растяжения. С поверхностными и неглубокозалегающими водами зона застойного режима практически не связана. Определенную роль в формировании вод зоны может играть зона затрудненного водообмена.

Проницаемость водоносных пород зоны застойного режима с глубиной уменьшается, а изолирующие свойства толщ глинистых пород ухудшаются вследствие потери пластичности в условиях повышенных давлений и температур (литификации), возникновения трещиноватости, в связи с чем для захоронения жидких отходов предпочтительнее использовать верхнюю и среднюю части зоны.

Зоны подземных вод обычно разделены водоупорными комплексами, являющимися региональными водоупорами, в пределах каждой зоны также выделяются водоупорные горизонты, играющие большую роль в формировании гидродинамической и гидрогеохимической зональности.

Критериями выделения различных зон являются состав подземных вод, напорный режим, глубина залегания и характеристики водовмещающих пород. Важными показателями являются состав растворенных газов и особенно присутствие гелия, возраст подземных вод, определяемый по содержанию и отношению содержаний различных изотопов, в том числе трития, углерода-14, урана, дейтерия, гелия, аргона и др.

Вместе с тем, известны нарушения закономерностей зональности подземных вод, например, когда на сравнительно небольших глубинах встречаются воды с признаками глубинных и древних — повышенное солесодержание и характерные для вод замедленного водообмена и застойного режима компоненты, повышенные содержания гелия, аномалии напорного режима и температурного поля. Эти явления присущи для участков глубинных тектонических нарушений (разломов), с проницаемой по вертикали плоскостью, по которым осуществляется связь между этажно расположенными водоносными комплексами и горизонтами, или участков повышенной трещиноватости тектонического происхождения. Подобные явления обычно приурочены к областям границ геоблоков, шовных зон, рифтов, авлакагентов и других проявлений глубинных тектонических структур земной коры.

Очевидно, что области развития подобных тектонических нарушений неблагоприятны для глубинного захоронения жидких РАО и промышленных стоков. Предварительные исследования позволяют достаточно уверенно определить степень изолированности водоносных горизонтов и комплексов изучаемого разреза, выявить признаки взаимосвязи горизонтов и избежать создания глубинных хранилищ в неблагоприятных условиях.

Далеко не все тектонические нарушения, развитые в платформенных областях и секущие толщи осадочных пород, водоносные комплексы и горизонты различных гидродинамических зон, являются каналами вертикальной связи. В большинстве

случаев они являются экранами, вертикальная связь по которым отсутствует.

Вертикальная зональность подземных вод широко распространена в пределах России: это практически вся Русская платформа, Прикаспийская впадина, Уральский краевой прогиб, Западно-Сибирская плита. Области вертикальной зональности хорошо совпадают с районами, благоприятными для глубинного захоронения промышленных сточных вод в соответствии с Картой масштаба 1:2 500 000, подготовленной Министерством геологии в 1969 г. под руководством академика А. В. Сидоренко.

2.2. КОЛЛЕКТОРСКИЕ И ИЗОЛИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Характерной особенностью большинства пород является их естественная пустотность — наличие в породах пор или трещин различного размера, сообщающихся между собой. Благодаря этому пористые породы определенного типа способны вмещать воды и растворы различных веществ. В естественных условиях поры проницаемых пород заполнены подземными водами, способными перемещаться в них под влиянием градиента давления (рис. 2).

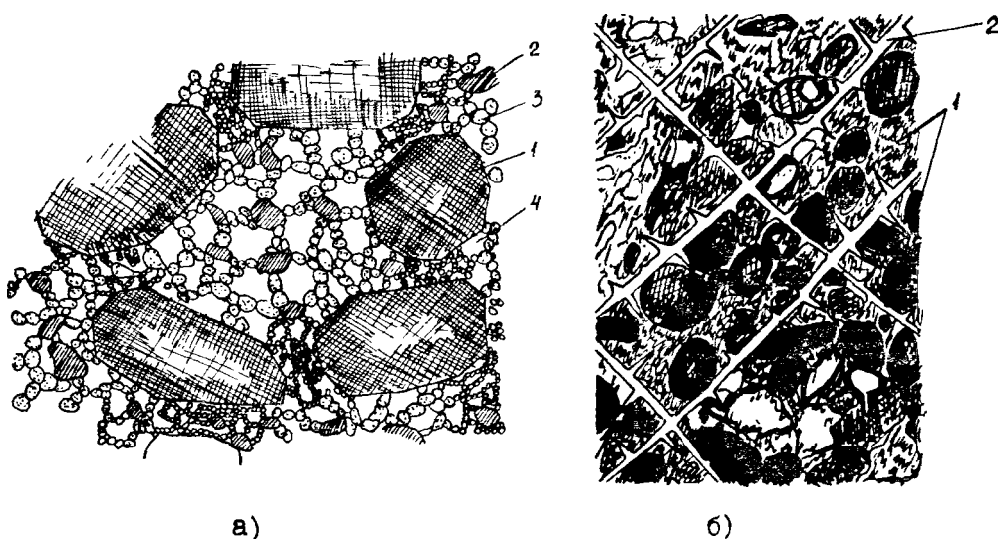


Рис. 2. Структура осадочных пород.

а) песчано-глинистая порода

1 — песчаные зерна; 2 — мелкие пылеватые зерна; 3 — глинистые частицы; 4 — поры.

б) карбонатная порода (известняк органогенно-шламовый)

1 — блоки; 2 — трещины.

Пористость пород оценивается отношением суммарного объема пор в образце к его объему, которое оценивается в процентах или в долях единицы. Значения пористости проницаемых пород, слагающих горизонты, пригодные для удаления в них растворов, характеризуются значениями 5—45%. На практике применяется понятие эффективной пористости, относящееся к той части пор, которые сообщаются между собой и могут заполняться при нагнетании растворов. Остальные поры являются тупиковыми или субкапиллярными.

Выделяется два типа пористости — блоковая и трещинная. Блоковая пористость характерна для рыхлых пород типа песков, слабосцементированных песчаников и некоторых видов известняков. Размеры пор характеризуются значениями: сверхкапиллярные — диаметром более 0,5 мм, в которых жидкость может свободно перемещаться, капиллярные — диаметром 0,0002—0,5 мм, в которых жидкость также перемещается, но при определенных условиях, и субкапиллярные — диаметром менее 0,0002 мм, в которых действие молекулярных сил настолько велико, что жидкость в них при наблюдающихся перепадах давления перемещаться не может. Максимальные размеры пор песчано-глинистых пород обычно не превышают 1 мм. В скальных и полускальных осадочных породах часто встречается трещинно-блоковая пористость. Пустотность пород представлена трещинами, делящими породу на пористые блоки. Размеры трещин обычно превышают размеры пор в блоках.

Пористые осадочные породы имеют значительную внутреннюю поверхность пор, достигающую значений нескольких кв. метров для одного куб. метра породы. Это обстоятельство имеет большое значение для физико-химических процессов взаимодействия жидких РАО с породами, протекающими на их внутренней поверхности и приводящими к задержке распространения компонентов РАО в результате сорбционных явлений.

Коллекторские свойства пород определяются также их фильтрационными свойствами или проницаемостью, поскольку для удаления отходов в пласт-коллектор необходимо обеспечить их распространение в поровом пространстве пласта-коллектора на достаточно большие расстояния от скважины при минимальных создаваемых градиентах давления.

Характеристикой фильтрационных свойств пород является коэффициент фильтрации, определяемый как расход потока

фильтрующей в пористой среде жидкости через единицу поверхности проницаемого слоя при единичном градиенте давления. Коэффициент проницаемости или проницаемость учитывают также вязкость фильтрующей жидкости. В связи с тем что жидкие РАО по вязкости мало отличаются от подземных вод, на практике вместо коэффициентов проницаемости обычно используются коэффициенты фильтрации.

Коэффициенты фильтрации проницаемых пород коллекторских горизонтов, используемых для захоронения жидких РАО, характеризуются значениями от 0,5 до 5 м/сут. Встречаются значения коэффициентов фильтрации до нескольких десятков и сотен метров в сутки, например для закарстованных пород или галечников. В связи с высокими скоростями движения вод в таких породах для глубинного захоронения жидких РАО и промстоков они непригодны. Низкие значения коэффициентов фильтрации менее 0,1 м/сут характерны для глинистых пород. Нагнетание в них растворов затруднительно в связи с развитием высоких давлений при малых расходах нагнетания.

Коллекторские свойства зависят также от мощности или толщины пласта или слоя, определяемой между нижней и верхней границами пласта. Применяется понятие эффективной мощности пласта — сумма мощностей проницаемых прослоев, способных поглощать растворы при их нагнетании. Эффективные мощности коллекторских горизонтов, пригодных для захоронения отходов, оцениваются величинами от первых десятков до ста метров.

Произведение эффективной мощности пласта-коллектора на средний коэффициент фильтрации представляет собой водопроводимость или гидропроводность, характеризующуюся значениями от нескольких десятков до сотен м²/сут. Произведение эффективной мощности на среднюю эффективную пористость принимается как удельная емкость пласта-коллектора, характеризующая полезный объем порового пространства пласта-коллектора в куб. м на 1 кв. м площади пласта. Удельная емкость имеет размерность метр и обычно характеризуется значениями от долей единицы до 10.

Пласты-коллекторы являются природными образованиями и поэтому неоднородны в плане и в разрезе. Существующие методы их исследования позволяют установить характер и масштабы неоднородностей, оценить их влияние на рас-

пределение отходов и принять правильное решение о проведении захоронения.

Важным свойством коллекторских пород, характеризующих их способность удерживать растворенные в отходах вещества, и прежде всего радиоактивные нуклиды, является их сорбционная способность. В результате протекающих в поровом пространстве сорбционных процессов радиоактивные нуклиды и некоторые химические соединения переходят в твердую фазу, задерживаются породами. Результаты исследований задерживающих свойств пород полигонов захоронения жидких РАО приведены в гл. 3. Характерной особенностью сорбционных процессов является их частично необратимый характер, т. е. десорбируется омывающим потоком подземных вод только часть нуклидов, остальные переходят в поровую жидкость в течение длительных периодов в результате выщелачивания и диффузионных процессов. Аналогичные явления наблюдаются и в природных условиях при образовании некоторых месторождений полезных ископаемых.

Жидкие РАО, находящиеся в поровом пространстве пласта-коллектора, должны быть изолированы от поверхности, неглубокозалегающих подземных вод и вышележащих водоносных горизонтов. Роль «покрышки» коллекторских горизонтов играют водоупорные комплексы и горизонты, широко развитые в мощных толщах осадочных пород и сложенные слоями различных глинистых пород (глины, глинистые сланцы, мергели, аргиллиты), реже солями, и подчиненными слоями проницаемых пород.

Изолирующие свойства водоупорных комплексов проявляются в природных условиях, они разделяют различные гидродинамические зоны и отдельные водоносные комплексы и горизонты, отличающиеся напорами и химизмом подземных вод.

Водоупорные комплексы и горизонты обязаны своими изолирующими свойствами главным образом пластикам глин, входящим в их состав. Глины являются высокопористыми породами, их поры являются субкапиллярами, молекулярные силы в которых препятствуют фильтрации.

Главнейшие составляющие глинистых пород — глинистые минералы групп каолинита, гидрослюд, монтмоиллонита, хлорита и тонкодисперсный обломочный материал — пелит. Глинистые частицы имеют в основной массе размер менее 0,004 мм, размер пелитовых частиц менее 0,001 мм. В качестве

примеси в глинистых породах присутствуют алевритовые, в меньшей степени песчаные зерна кварца, полевых шпатов, мусковита и т. д.

Для возникновения фильтрационных процессов в глинах необходимы особые условия: градиенты давления выше пороговых значений, повышение температуры, увеличение солевого содержания контактирующих вод и т. д. При возникновении фильтрации расход и скорость потока незначительны в связи с низкими значениями коэффициентов фильтрации глин, находящихся обычно в пределах $10^{-3} - 10^{-6}$ м/сут.

Характерной особенностью глин является зависимость их экранирующих и фильтрационных свойств от ряда факторов, что необходимо учитывать при глубинном захоронении промыслов. Так, при повышении давления в ниже- или вышележащем горизонте возможно как снижение, так и увеличение проницаемости (24). Замена пластовой жидкости в глинистом коллекторе на жидкие РАО с меньшим солевым содержанием вызывает уменьшение проницаемости перекрывающих коллекторов глинистых пород; с увеличением температуры проницаемость несколько увеличивается.

Слоистость водоупорных комплексов и наличие в их составе слоев пластичных и проницаемых пород обуславливают сохранение их сплошности и изолирующих свойств, несмотря на создание областей повышенных давлений при нагнетании отходов, проявления неотектонических и современных движений в земной коре. С увеличением глубины залегания пористость и проницаемость глин снижаются, они видоизменяются и переходят в аргиллиты и глинистые сланцы. На больших глубинах вследствие проявления трещиноватости их проницаемость может увеличиваться. Основную роль покрышек при этом начинают играть соленосные отложения, мергели. Ухудшение экранирующей способности глинистых пород и обусловленные этим вертикальные перетоки между ниже- и выше-залегаящими горизонтами обычно отмечается в зонах тектонических нарушений с проницаемой плоскостью, участках опесчанивания глинистых пород (литологические «окна»). Такие места могут быть уверенно выделены при предварительных исследованиях, размещение участка захоронения осуществляется таким образом, чтобы нагнетание отходов не повлияло на состояние вышележащих горизонтов.

Экранирующая способность глинистых толщ убедительно подтверждается на примере образования и сохранения нефтегазовых месторождений. Глинистые минералы обладают вы-

сокой сорбционной способностью по отношению к микрокомпонентам фильтрующейся жидкости, какими являются радиоактивные нуклиды.

2.3. ПРОЯВЛЕНИЕ ИЗОЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Глубинное захоронение жидких РАО сопровождается различными процессами, приводящими к перераспределению вещества между твердой и жидкой фазами в пространстве и во времени, образованию новых неоднородностей в геологической среде в виде скоплений компонентов отходов. Аналогичные процессы протекают в естественных условиях при образовании месторождений полезных ископаемых и представляют интерес для оценки способностей геологической среды концентрировать в ограниченных объемах вещество в твердом, жидком и газообразном состоянии. С этой точки зрения прежде всего привлекают внимание месторождения нефти и газа, определенные типы урановых месторождений.

Закономерности формирования и строения нефтегазовых залежей представляют большой интерес для уточнения критериев пригодности геологических структур для захоронения жидких РАО и промстоков, определения методики разведки хранилищ и приемов их эксплуатации.

О происхождении залежей жидких и газообразных углеводородов в настоящее время не имеется единой точки зрения. Большинство геологов-нефтяников склоняется к концепции происхождения нефти и органического вещества, захороненного на месте древних водоемов вместе с мелкодисперсными продуктами разрушения и выветривания горных пород суши, выносимыми реками. Идеи об органическом происхождении нефти высказывались В. И. Вернадским, А. В. Сидоренко и были в последующем развиты Н. Б. Вассоевичем, А. А. Бакировым, И. О. Бродом и др. [25]. Рядом ученых выдвигается гипотеза о неорганическом происхождении углеводородов нефти и газа в результате сложных взаимодействий углерода и водорода в мантии и ядре Земли при аномальных условиях и последующей дегазации внутренних оболочек Земли. Заслуживают внимания гипотезы о происхождении углеводородов из органического вещества литосферы под воздействием глубинных процессов, связанных с развитием магматических оча-

гов, температурными и геодинамическими нагрузками, воздействием электрических полей в зонах глубинных тектонических нарушений и т. д.

В соответствии с основными представлениями концепции органического происхождения нефти и газа первичным источником углеводородов являлось органическое вещество типа сапропеля, включающее остатки растительности и живых организмов — обитателей теплых морей, лагун и озер, накапливающихся на их дне совместно с минеральными осадками. При последующем общем погружении бассейнов осадконакопления мощность образующихся из осадков перекрывающих пород увеличивалась, развивались высокие геостатические нагрузки и увеличивались температуры, что приводило к сложным преобразованиям органического вещества и вмещающих пород в течение длительных периодов времени (миллионы лет), генерации жидких и газообразных углеводородов, высвобождению химически и физически связанной воды, отжатию флюидов и пород нефтегазоматеринской толщи и их попаданию в коллекторские породы типа песков, песчаников, известняков, миграции углеводородов в той или иной форме вследствие гравитационных (всплытие) или тектоногидравлических явлений в проницаемых породах до барьеров, образуемых слабопроницаемыми флюидоупорами, где имелись благоприятные условия для накопления и сохранения жидких и газообразных углеводородов.

Места скоплений нефти и газа принято называть «ловушками». Роль «ловушек» могут выполнять положительные структуры в кровле коллекторского горизонта, перекрытого слабопроницаемой толщей глинистых пород или солей — флюидоупором, в осевых частях которых скапливаются более легкие, чем пластовые воды, углеводороды, участки замещения проницаемых пород пласта-коллектора на менее проницаемые, зоны пересечения коллекторского горизонта тектоническим нарушением, являющимся экраном вследствие примыкания слабопроницаемых пород. На рис. 3а приведены характерные виды залежей одного из районов Западной Сибири [26]. Залежь нефти в осевой части антиклинальной складки соответствует структурной и на крыльях складки — литологической «ловушке». Характерной особенностью залежей последнего типа является их образование в местах моноклиналиного залегания пород и при сравнительно небольшом снижении проницаемости коллекторских пород, обусловившем задержку мигрирующей нефти.

На рис. 3б приведены типы залежей, образовавшихся в зоне тектонического нарушения (сброс), плоскость которого является экраном для углеводородов (Досор, Прикаспий).

«Ловушки» тектонического типа широко распространены на нефтяных месторождениях Северного Кавказа. Несмотря на повышенную сейсмическую активность региона, непроницаемые зоны тектонических нарушений и примыкающие к ним

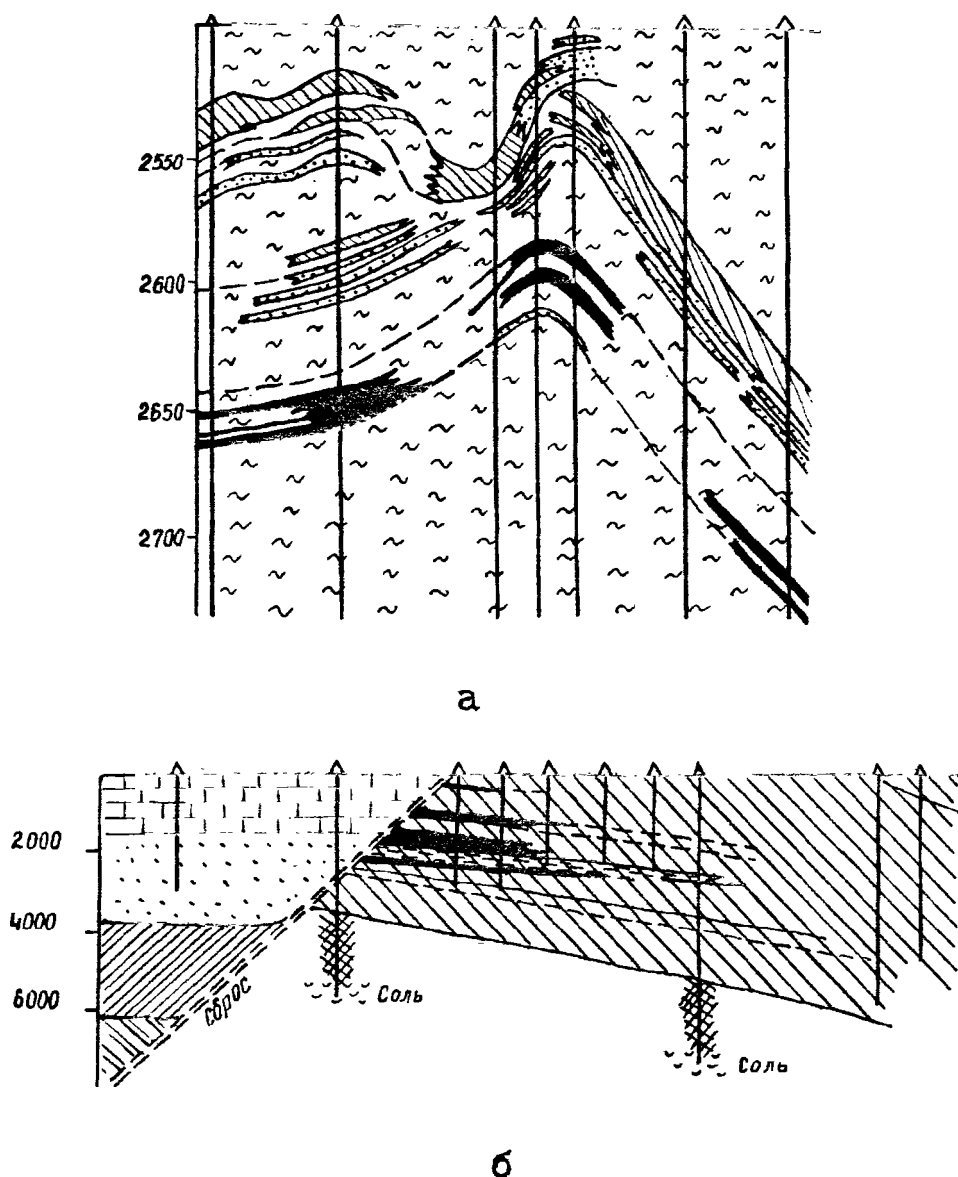


Рис. 3. Некоторые типы залежей углеводородов в осадочных толщах
а) Западная Сибирь, б) Прикаспий

слабопроницаемые породы являются достаточными экранами для нефтяных и газовых залежей. В Ульяновском Поволжье также встречены нефтяные залежи, приуроченные к глубинным тектоническим структурам. В то же время глубинные зоны тектонических нарушений в ранние этапы геологического развития могли быть проницаемыми, а контактирующие породы трещиноватыми, что обуславливало миграцию углеводородов по ним до места их локализации в зоне тектонического экрана.

Залежи углеводородов могут образовываться непосредственно в толще нефтегазоматеринских пород, в слоях пористых проницаемых пород, обладающих коллекторскими свойствами и условиями накопления нефти и газа. Часто отмечается удаление залежей на десятки и более километров от материнских, что имеет место при отсутствии необходимых для нефтегазонакопления условий в непосредственной близости. Продолжительность формирования залежей углеводородов от начала их выделения из материнской толщи оценивается в геологическом масштабе времени сотнями тысяч и миллионами лет.

Неорганические гипотезы происхождения нефти предполагают значительно большие и сложные пути миграции и преобразования углеводородов, однако и здесь коллекторские и удерживающие свойства проницаемых пород, изолирующие свойства слабопроницаемых пород, условия их залегания играют решающую роль при образовании залежей.

Известны факты расформирования залежей нефти и газа вследствие различных процессов, связанных с естественным преобразованием геологической среды. Остатки таких залежей могут быть обнаружены по характерным признакам. Процесс расформирования залежи, особенно нефтяной, является весьма замедленным и протекает в течение геологических периодов времени, оцениваемых сотнями тысяч и миллионов лет.

Нефтяные залежи обычно характеризуются высоконапорным режимом, в ряде случаев пластовые давления имеют аномальные значения (зоны АВПД), что связано с тектоногидравлическими явлениями. Тем не менее, флюидоупоры даже небольшой мощности (10—20 м) способны изолировать залежи от вышележащих горизонтов.

Хорошо известный в пределах Русской платформы флюидоупор верейского горизонта (средний карбон), являющийся покрывкой некоторых нефтяных залежей Удмуртии, Ульяновского Поволжья и т. д., характеризуется общей мощностью 30—50 м. Нефтяные залежи отмечены как в его пределах в терригенных коллекторах, так и в нижележащих карбонат-

ных [26, 27]. По данным ряда исследователей, для изоляции углеводородов флюидоупором его гидропроводность должна быть не менее чем в 400 раз меньше, чем коллекторского горизонта [28].

При разработке нефтяных месторождений широко применяется заводнение нефтяных пластов с целью более полного извлечения нефти. При этом осуществляется нагнетание вод через специально сооружаемые скважины, объемы нагнетания часто превышают объемы извлекаемой нефти. Технологические приемы заводнения имеют много общего с глубинным захоронением промстоков [29].

Приведенные в данном разделе сведения об образовании нефтегазовых месторождений не претендуют на детальное освещение всех вопросов образования и строения нефтегазовых месторождений, их разработки, однако позволяют сформулировать ряд важных выводов применительно к глубинному захоронению жидких РАО:

- нефтяные залежи могут образовываться в пределах характерных структур и локальных неоднородностей геологической среды, связанных с уменьшением проницаемости пород, препятствующих дальнейшей миграции нефти;

- роль флюидоупоров — покрышек залежей, играют горизонты слабопроницаемых пород (глины, аргиллиты, соли, доломиты); мощность флюидоупоров от первых десятков метров достаточна для изоляции залежи в течение длительных периодов времени;

- широко распространены нефтяные структуры, связанные с тектоникой, в которых плоскости тектонических нарушений являются экранами для нефти и газа, обеспечивающими их изоляцию в течение длительных периодов времени; подобные структуры отмечаются и в областях с повышенной сейсмической активностью, что свидетельствует о стабильности большинства сформировавшихся тектонических структур;

- процессы образования нефтегазовых залежей или их переформирования протекают в геологически значимые отрезки времени;

- коллекторские породы способны вмещать значительные объемы нефти и газа, а также вод, нагнетаемых через систему скважин при разработке нефтяных месторождений.

Ряд месторождений твердых полезных ископаемых образовался при определенных условиях в результате перехода в горные породы первоначально растворенного вещества в подземных водах, контактирующих с пористыми проницаемыми горными породами.

Хорошо известны инфильтрационные (экзогенные, эпигенитические) Среднеазиатские месторождения урана, где он находится в проницаемых пластообразно-залегающих водоносных породах. Рудные тела оконтуриваются границами пластового окисления и соответствуют области ранее существовавшего геохимического барьера [30]. Залежи приурочены к захороненным дельтовым отложениям древних рек и контролируются зонами потоковых фаций. Образование залежей связано с горизонтальным движением подземных вод, содержащих растворенные соединения урана, поступившего в воды при выветривании и размыве массивов ураносодержащих «материнских» пород, расположенных в бассейнах древних рек. Воды, обогащенные атмосферным кислородом, поступали в подземные водоносные горизонты песчано-глинистых пород, встречали на своем пути участки пород, обогащенные органическим веществом и характеризующиеся восстановительной обстановкой, что приводило к возникновению слаборастворимых соединений урана, образующих вторичные минералы.

Залежи урановых руд сохранились в течение десятков и сотен тысяч лет, несмотря на естественное движение их омывающих пресных и слабосоленых вод.

Об устойчивости урановой минерализации в проницаемых породах свидетельствуют такие факты: содержание урана в подземных водах рудных горизонтов, залегающих на глубине первых десятков и сотен метров, близко к фоновым, для растворения минералов урана требуются растворы с содержанием серной кислоты не менее 1—2 г/л.

Области геологической среды, характеризующиеся изменением физико-химических свойств пород или фильтрующихся растворов и приводящих к накоплению в породах первоначально растворенного вещества, называются физико-химическими или геохимическими барьерами.

Известны барьеры различных типов. Кислородный барьер формируется в местах контакта бескислородных вод, содержащих сероводород, двухвалентное железо и другие элементы в восстановленной форме, с кислородными водами или кислородом воздуха. На кислородном барьере образуются месторождения серы. Сероводородный барьер возникает в местах контакта кислородных или углекислых вод с сероводородными, он является причиной образования сульфатных руд меди, свинца, цинка и других металлов. Сорбционный барьер образуется в месте изменения сорбционных свойств, в том числе ионнообменной способности глинистых пород. Многие крупные месторождения твердых полезных ископаемых воз-

никли в области геохимических барьеров миллионы и миллиарды лет назад и сохранились до наших дней.

Задерживающие свойства горных пород по отношению к растворенным соединениям проявляются и при взаимодействии гидротерм глубинных магматических очагов, содержащих различные соединения, с горными породами. В области геохимических барьеров, а также вследствие снижения температуры и давления образуются гидротермальные месторождения различных типов.

Очевидно, что между процессами распространения жидких РАО в коллекторских породах и их взаимодействия и природными гидрогеохимическими процессами могут быть проведены определенные аналогии, а образование скоплений компонентов РАО в коллекторских горизонтах в результате физико-химических явлений может рассматриваться как образование техногенных «месторождений». Возможно создание искусственных геохимических барьеров на пути движения жидких РАО с целью ограничения их распространения с подземными водами, инициирования физико-химических процессов выделения компонентов жидких РАО в твердую фазу — горные породы. Исследования природных процессов подтверждают осуществимость таких технологий.

2.4. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Геологическое строение Земли в целом и отдельных регионов не является окончательно сложившимся и подвержено изменениям различного характера и интенсивности, связанных как с глубинными (эндогенными) процессами, так и с воздействием атмосферных факторов, рек, ледников и т. д. (экзогенные процессы). Все большее значение в изменении геологической среды приобретает деятельность человека.

При рассмотрении проблемы глубинного захоронения жидких РАО необходимо оценить влияние подобных явлений на изоляцию отходов в недрах. При этом наибольшее внимание привлекают глубинные процессы, выражающиеся в подъеме и опускании поверхности, горизонтальных перемещениях участков суши. Эти процессы связаны с конвективными течениями в мантии, возбуждаемыми термодинамическими явлениями и гравитационной дифференциацией ее вещества в сочетании с действием силы тяжести и стремлением литосферы к гравитационному равновесию по отношению к поверхности астеносферы.

Благодаря прогибанию отдельных участков земной поверхности на геосинклинальном этапе их развития в геологическом прошлом образовались толщи осадочных пород мощностью до нескольких тысяч метров. Воздымание горных сооружений сопровождалось их разрушением и сносом продуктов разрушения в области прогибания.

Изменения положения поверхности наблюдаются и в настоящее время. По комплексу геологических и геоморфологических признаков скорость воздымания или опускания платформенных областей, например Западно-Сибирской плиты, характеризуется значениями до 1 мм в год, а по геодезическим наблюдениям, оценивается до 10 мм в год и более, однако имеет разнонаправленный характер [31]. Подобное различие обусловлено тем, что геологическая информация отражает общую тенденцию (тренд) вертикальных движений для периодов времени длительностью тысячи и более лет, а геодезические данные — короткопериодные изменения положения поверхности, связанные не только с глубинными процессами и носящим колебательный характер.

Знак вертикальных перемещений поверхности может меняться с различной периодичностью, поднятие может сменяться опусканием и наоборот. Проявления горизонтальных движений — это тектоника плит (дрейф континентов), возникновение срединных океанических хребтов, зон субдукции и спрединга.

Хорошо известны исторические факты изменения положения поверхности. Древний храм Юпитера на берегу Неаполитанского залива за два тысячелетия сначала опустился вместе с участком суши не менее чем на 6 м, а затем вновь поднялся. Город Упсала в Швеции, построенный на берегу моря, сейчас находится на расстоянии 60 км от берега. Изменились очертания Чудского озера и Вороний камень, с которого Александр Невский руководил битвой, находится под водой.

Движения земной коры сопровождались возникновением тектонической трещиноватости и разрывных нарушений толщ горных пород между их участками, характеризующимися различием направлений или скоростей перемещений. Тектонические процессы сопровождаются возникновением очагов сейсмических колебаний. Тектонические разрывные нарушения или «разломы» встречаются повсеместно и выделяются прежде всего по смещению геологических образований и слоев горных пород.

При обсуждении проблемы глубинного захоронения РАО и влияния на условия их изоляции тектонических процессов возникают следующие вопросы:

— не приведет ли воздымание земной коры к попаданию отходов вместе с вмещающими породами на поверхность в среду непосредственной деятельности человека;

— какое влияние на изоляцию отходов в недрах могут оказать глубинные разломы или тектонические нарушения, как существовавшие ранее, так и вновь образующиеся;

— какое воздействие на отходы будет оказывать естественная сейсмичность.

Имеющийся опыт геологических наблюдений и специальных исследований позволяет ответить на эти вопросы.

Если принять постоянную скорость подъема поверхности 1 мм в год, что несколько превышает фактически определенную, например, для южной части Западно-Сибирской плиты, то за 1 тыс. лет подъем поверхности составит 1 м и не приведет к значимым изменениям геологических условий за время, пока отходы будут сохранять свою радиотоксичность. При глубине локализации отходов более 400 м вмещающие их породы окажутся на поверхности через 400 тыс. лет при том условии, что в течение этого времени периоды подъема поверхности не будут сменяться опусканием.

Очевидно, что подобные процессы при соответствующих геологических условиях практически не повлияют на локализацию отходов в течение реальных отрезков времени. Вместе с тем в областях современного горообразования подъем поверхности может протекать с большей интенсивностью и не монотонно. Определенную опасность представляет и вулканическая деятельность в областях ее развития. В связи с этим в подобных условиях захоронение РАО не проводится.

Районы, в которых допускается захоронение жидких РАО, обычно имеют двухъярусное строение. Нижний ярус — фундамент сложен кристаллическими породами и верхний — осадочным комплексом, включающим коллекторские горизонты и изолирующие их водоупорные образования. Тектонические нарушения различного характера широко распространены в фундаменте и образовались в процессе деформации фундамента на геосинклинальном этапе развития сотни миллионов и миллиарды лет назад. Некоторые тектонические нарушения проявляются также в осадочном чехле и являются следствием тектонических движений в процессе образования осадочной толщи или после завершения осадконакопления. В последнем случае тектонические нарушения достигают поверхности.

Известны вторичные или «атектонические» разрывные нарушения, образовавшиеся не вследствие глубинных процессов, а в результате смещения пород под влиянием возникновения

гравитационных градиентов при подъеме поверхности, древних оползнях. Такие разрывные нарушения отмечаются в верхних слоях осадочных пород и затухают с глубиной.

Выделяют новейшие тектонические структуры, формировавшиеся на протяжении позднего кайнозоя (около 30—35 млн. лет). Обычно такие структуры отражаются в условиях залегания осадочных пород верхних частей разреза, рельефе поверхности.

Помимо собственно разрывных нарушений, смещающих коренные породы фундамента и вышезалегающие более поздние отложения, встречаются весьма распространенные «структурные линии», представляющие собой легко дешифрируемые по аэро-, космо- и топоматериалам спрямленные элементы рельефа или ландшафта — долины, границы болот, уступы, четкие подножья и перегибы склонов и т. д. Структурные линии в подавляющем большинстве случаев не представляют собой разрывов сплошности осадочных пород с их вертикальным или горизонтальным смещением. Ряд ученых предполагает, что они могут быть ослабленными зонами, в пределах которых возможна повышенная трещиноватость, и могут соответствовать тектоническим нарушениям в фундаменте.

Мнения о роли структурных линий или линеаментов часто противоречивы. Считается, что зоны линеаментов и особенно их сгущения и пересечения характеризуются повышенной проницаемостью осадочных пород в вертикальном направлении. Вместе с тем именно к пересечениям линеаментов и глубинным тектоническим нарушениям приурочены залежи углеводородов, например, в Удмуртии и Ульяновском Поволжье широко распространены тектонические «ловушки» нефти и газа. Очевидно, что повышенная проницаемость этих зон от нижних до верхних горизонтов не способствовала бы образованию и сохранению этих залежей.

Весьма характерен такой факт. В районе Калининской АЭС на макете карты активных разломов М 1:2 500 000, подготавливаемой в Геологическом институте РАН, показано пересечение 2 линеаментов, что дало повод для серьезных опасений. Вместе с тем бурение и исследование 7 глубоких скважин непосредственно вблизи АЭС не показали существования каких-либо признаков нарушения осадочного чехла и связи горизонтов.

Особое внимание привлекают тектонические структуры, называемые активными разломами. Имеются различные мнения о критериях их выделения. Обычно под активными разломами понимаются тектонические линейные дизъюнктивные нарушения с признаками однонаправленных перемещений со скоростью порядка 1 см/год, имеющих глубинную геодинамическую

природу и проявляющихся в четвертичное время или в последние 0,7 млн. лет. Естественно, что в результате динамического влияния разлома образуется деструктивное поле, обуславливающее повышенную трещиноватость и проницаемость пород, а долговременная локализация жидких РАО в приразломных зонах не может быть гарантирована. Подобные участки исключаются из мест, пригодных для захоронения РАО.

Активные разломы в регионах, в которых имеются условия для захоронения жидких отходов, например в областях платформы, встречаются сравнительно редко, они могут быть выделены по комплексу признаков—геологических, геоморфологических, гидродинамических, гидрогеохимических и т. д. При необходимости могут быть проведены специальные работы по установлению природы разлома.

Некоторые исследователи склонны придавать свойства активных разломов всем «шовным» зонам платформ, разделяющих геоблоки и выделяемые по сгущению структурных линий и линияментов [32]. С этим нельзя полностью согласиться, хотя отдельные шовные зоны и их участки характеризуются признаками активных разломов.

В своем большинстве тектонические нарушения разрывного характера представляют собой устойчивые структуры, не испытывающие тенденции к каким-либо изменениям, перемещениям контактирующих блоков и т. д. По данным И. В. Ананьина, полученным при исследовании прохождения сейсмической энергии сильных землетрясений, только 18—20% глубинных разломов Кавказа характеризуются полями повышенных напряжений, что может свидетельствовать об их современной активности. Остальные разломы «прозрачны» для сейсмической энергии. В Предкавказье зоны разломов являются гидродинамическими экранами и образуют «ловушки» для нефтегазовых залежей, сохранившихся в течение сотен тысяч и миллионов лет.

Таким образом, существование тектонических нарушений разрывного характера или глубинных разломов в месте предполагаемого захоронения жидких РАО еще не означает его заведомую непригодность для этой цели.

Большинство разломов в интересующих, с точки зрения захоронения, областях платформ являются стабильными структурами в течение десятков и сотен миллионов лет, связанные с ними разрывные нарушения ограничиваются фундаментом или нижней частью осадочного чехла ниже перспективных коллекторских горизонтов. Вместе с тем определенные опасения должны вызывать тектонические нарушения с явными признаками активных, а также секущие коллекторские

горизонты и перекрывающие водоупорные образования и особенно те из них, которые имеют проницаемые плоскости смещения. Участки, расположенные непосредственно в зоне подобных тектонических нарушений и на расстоянии нескольких километров от них, будут, очевидно, непригодны для создания полигонов. В каждом конкретном случае тектонические условия предполагаемого участка захоронения должны исследоваться. На рис. 4 приведены схематические изображения тектонических нарушений, типизированных применительно к условиям захоронения жидких РАО.

Естественные изменения геологической среды сопровождаются возникновением глубинных источников сейсмических колебаний, вызывающих на поверхности землетрясения различной интенсивности вплоть до разрушительных. Естественная сейсмичность является фактором, лимитирующим создание ответственных сооружений, в том числе связанных с обращением с отходами. Применительно к глубинному захоронению жидких, в том числе радиоактивных, отходов оценка сейсмической опасности имеет свои особенности, что обусловлено уменьшением сейсмического воздействия с глубиной.

По данным оценок Канадских геологов по заказу компании Онтарио-Гидро в связи с захоронением отвержденных РАО, интенсивность сейсмического воздействия с глубиной уменьшается по зависимости, близкой к экспоненциальной. В мировой практике известны случаи, например в Китае, когда при землетрясениях горные выработки сохраняли устойчивость и все из находящихся в них шахтеры поднимались на поверхность, хотя населенный пункт рядом с шахтой был полностью разрушен. При разрушительном Газлийском землетрясении глубокие буровые скважины, используемые для добычи газа, практически не были повреждены, хотя поверхностное оборудование претерпело разрушения [33].

В связи с этим ограничение создания полигонов захоронения жидких РАО по сейсмичности относится прежде всего к поверхностным сооружениям — павильонам скважин, трубопроводам, насосным станциям и т. д., которые при необходимости могут быть построены в сейсмостойком исполнении.

Значимое воздействие на геологические образования могут оказывать сейсмодислокации, связанные с разрушением или резким изменением условий залегания пород, развивающимися при землетрясениях с относительно малой глубиной гипоцентра. В районах, характеризующихся повышенной сейсмич-

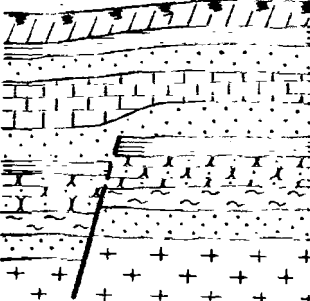
	Характер нарушения	Методы обнаружения и исследования
	<p>Нарушение развито только в фундаменте и проявляется в образованиях коры выветривания. Практически не влияет на условия изолированности коллекторских горизонтов.</p>	<p>Геофизические методы (магнито-, сейсморазведка), бурение 2—3 скважин. Захоронение в районе тектонического нарушения возможно.</p>
	<p>Нарушение развито в фундаменте и перекрывающих его образованиях, выше проявляется в виде пликативного залегания слоев. Может влиять на изолированность в интервалах разрыва сплошности.</p>	<p>Геофизические методы, бурение 2—3 скважин. Захоронение возможно при подтверждении изолирующих свойств и их сохранения в будущем.</p>
	<p>Нарушение сечет фундамент и вышезалегающие образования, плоскость смещения заглинизирована и является экраном, изолирующим коллекторские горизонты.</p>	<p>Геофизические методы, бурение скважин, опытно-фильтрационные исследования. Требуется убедительное доказательство возможности захоронения.</p>
	<p>Нарушение сечет фундамент и вышезалегающие образования, плоскость смещения проницаема, по ней возможна связь горизонтов.</p>	<p>Геофизические методы, бурение скважин, опытно-фильтрационные исследования. Захоронение невозможно.</p>

Рис. 4. Схемы возможных тектонических нарушений

ностью и подобными землетрясениями, глубинное захоронение жидких РАО обычно не проводится.

Увеличение сотрясаемости поверхности относительно прогнозной для региона в целом зависит от состава, обводненности и условий залегания грунтов. Этот фактор имеет значение для поверхностных сооружений, но не для глубоких скважин и пластов-коллекторов, вмещающих отходы.

Таким образом, анализ литературных данных и имеющихся материалов наблюдений о характере и последствиях землетрясений показывает, что они не будут оказывать значимого воздействия на скважины и коллекторские горизонты полигонов захоронения жидких РАО, располагаемых обычно в областях платформ и краевых прогибов, характеризующихся низкой сейсмичностью. Не представляют опасности землетрясения и для поверхностного комплекса полигонов захоронения, сооружения которых имеют небольшую этажность (1—2), малые линейные размеры оснований и нагрузки на грунты.

К экзогенным изменениям геологической среды относятся прежде всего деятельность рек, ледников, воздействие климатических факторов. Глубина влияния подобных явлений оценивается метрами или десятками метров, они не затрагивают коллекторские горизонты, вмещающие жидкие РАО. Иной характер может иметь деятельность человека. Бурение глубоких скважин в местах захоронения РАО, проходка горных выработок может привести к вскрытию коллекторских горизонтов, содержащих отходы, попаданию компонентов отходов на поверхность, в неглубокозалегающие грунтовые воды.

Для предупреждения подобных явлений в районе полигонов захоронения отходов вводятся ограничения пользования недрами, регламентируемые выдаваемыми лицензиями и границами горного отвода. Сведения о характере и последствиях того или иного пользования недрами оформляются в форме, пригодной для длительного хранения и использования регулирующими и контролирующими органами при выдаче различных разрешений и лицензий.

Глубокозалегающие пласты-коллекторы труднодоступны для случайного и преднамеренного проникновения—для их вскрытия требуется применение специального бурового оборудования, обслуживаемого достаточно квалифицированными специалистами. Благодаря этому может быть обеспечено достаточно эффективное регулирование пользования недрами, отпадает необходимость установления особых режимов охраны в районах захоронения после его завершения. Очевидно, что

при поверхностном размещении отходов требования к их охране должны быть принципиально отличными.

В качестве гипотетической ситуации может быть рассмотрен случай утраты информации о захоронении РАО последующими поколениями людей, в связи с чем будет возможно случайное вскрытие пласта-коллектора, содержащего РАО. По-видимому, подобная утеря информации будет иметь место при утере всего опыта предыдущих поколений, в том числе и о бурении скважин, проходке горных выработок и т. д. Для восстановления полностью утраченных технологий должно пройти время, как показывает исторический опыт, не менее нескольких тысяч лет, в течение которых радионуклиды-компоненты РАО должны распасться.

К последствиям деятельности человека относятся также нарушения геодинамического равновесия геологической среды в результате изменения напорного режима коллекторских горизонтов при нагнетании отходов. Многим специалистам известен случай вызванной сейсмичности в Дэнвере (США). Нагнетание жидких отходов осуществлялось непосредственно в проницаемую зону тектонического нарушения, относящуюся к системе крупного разлома Сан-Андреас, область которого характеризуется повышенной сейсмичностью. Повышение гидростатического давления привело к уменьшению сцепления в зоне нарушения между блоками, контактирующими по плоскости тектонического нарушения, находящимися в напряженном состоянии, возникновению подвижек и слабых очагов сейсмических колебаний. Зарегистрированные землетрясения характеризовались низкой интенсивностью. В последующем подобный механизм возникновения вызванной сейсмичности был подтвержден специальными исследованиями на нефтяных месторождениях [34, 35]. Для предупреждения подобных явлений не следует осуществлять захоронение жидких отходов непосредственно в проницаемые зоны тектонических нарушений, контактирующие блоки которых сложены скальными породами и которые находятся в регионах с повышенной сейсмичностью.

2.5. ЗАХОРОНЕНИЕ ЖИДКИХ РАО И ДОБЫЧА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Глубинное захоронение жидких отходов накладывает ограничения на использование геологической среды в других целях, в том числе для разработки месторождений полезных

ископаемых, если таковые имеются в области влияния захоронения или будут обнаружены в последующем.

Для уменьшения потерь природных ресурсов недр вследствие захоронения отходов, при проведении предварительных исследований района обращается внимание на признаки полезных ископаемых и при необходимости осуществляется оценка перспективных участков. Решение о создании системы захоронения применяется с учетом наличия в районе месторождений полезных ископаемых, рудо-, нефте- или газопроявлений. При необходимости выполняются расчеты взаимовлияния захоронения и, например, разработки нефтяных залежей. Как показывают расчеты, выполненные для условий Удмуртии, Ульяновского Поволжья, удаление нефтяных залежей на 15 км и более достаточно для создания системы глубинного захоронения даже в том же коллекторе, который содержит нефть.

Одним из видов полезных ископаемых являются подземные воды, как пресные, используемые для водоснабжения, так и соледержащие, применяемые в бальнеологических целях, для получения иода и брома. Подземные воды распространены практически повсеместно в комплексах осадочных пород, содержащих коллекторские горизонты. Глубинное захоронение отходов, в том числе жидких РАО, неизбежно связано с выводом определенных ресурсов подземных вод из возможного использования, однако, как показывают расчеты, выполненные для ряда районов, эти потери относительно невелики и с лихвой окупаются положительным эффектом от предупреждения вредного влияния отходов на человека.

В соответствии с существующими нормативными положениями запрещается использование подземных вод, находящихся в пласте-коллекторе и вышележащем буферном горизонте в пределах горного отвода недр (второй пояс санитарно-защитной зоны). Запрет использования вод вышележащих, в том числе неглубокозалегающих, горизонтов распространяется на участок, где расположены нагнетательные скважины (первый пояс санитарно-защитной зоны). В то же время подземные воды этих горизонтов могут быть использованы для технического водоснабжения системы захоронения. За пределами горного отвода недр устанавливается третий пояс санитарно-защитной зоны, устройство водозаборов в которой должно согласовываться с условиями захоронения отходов. На рис. 5 приведена схема горного отвода недр системы захоронения и ограничения использования подземных вод.

Большая часть естественных запасов пресных подземных вод сосредоточена в верхних частях разреза в основном

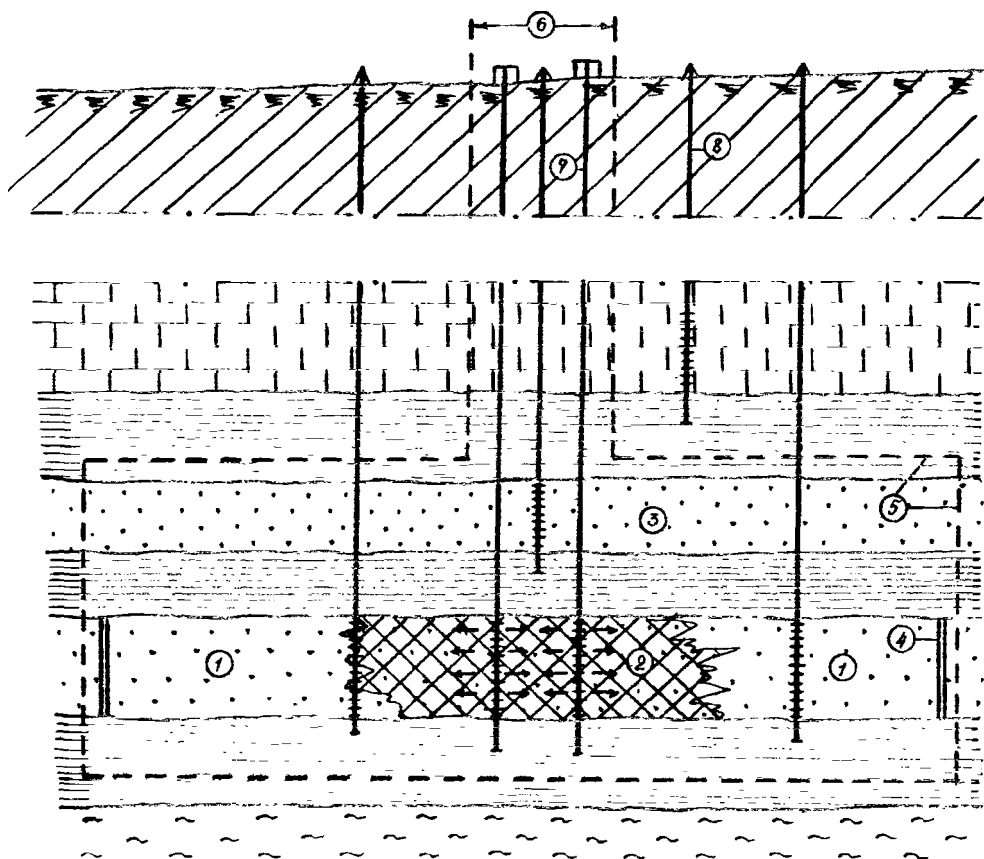


Рис. 5. Схема горного отвода недр полигона глубинного захоронения жидких РАО

1—пласт-коллектор; 2—область пласта-коллектора, занятая отходами; 3—буферный горизонт; 4—прогнозная граница максимального распространения отходов; 5—граница горного отвода недр; 6—нагнетательный контур; 7—нагнетательная скважина; 8—наблюдательная скважина

до глубин 100—200 м, в связи с чем вывод естественных запасов глубоких горизонтов в небольшой степени сказывается на общих запасах района. Были выполнены расчеты ущерба для запасов подземных вод водохозяйственного района площадью 1500 км², примерно в центре которого осуществляется захоронение жидких РАО Сибирского химического комбината. Запасы подземных вод, которые не могут быть использованы из-за захоронения, составляют в зависимости от метода расчета 1—3%. Границы района устанавливались исходя из общности хозяйственных связей существующих и возможных пользователей подземными водами и административного деления.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

3.1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ

Решение проблемы глубинного захоронения жидких РАО являлось сложной научно-технической задачей, требовавшей проведения комплексных исследований, обоснований и проектных проработок. Это хорошо осознавали инициаторы и организаторы работ, благодаря чему первыми мероприятиями в решении проблемы являлось создание концептуальных основ глубинного захоронения жидких РАО, постановка комплексных исследований и геологических изысканий, предварительные проектные проработки.

Впервые конкретные предложения об организации работ по глубинному захоронению РАО были сформулированы и направлены в Правительство профессором Уральского политехнического института С. А. Вознесенским в 1957 г. Поводом для этого послужил, очевидно, взрыв емкости — хранилища высокоактивных отходов на Южном Урале в 1957 г., содержавшей 20 млн. Ки в виде отходов, загрязнение р. Теча и прилегающих территорий вокруг поверхностных хранилищ и водоемов. Непосредственный участник обследований состояния окружающей среды в районе радиохимических производств Южного Урала (ныне ПО «Маяк») С. А. Вознесенский воочию убедился в высокой опасности применяемых технологий обращения с жидкими РАО.

Предложения С. А. Вознесенского были поддержаны академиком В. И. Спицыным, известным ученым в области физической химии, и академиком А. П. Виноградовым, возглавлявшим Институт геохимии и аналитической химии Академии Наук. Из материалов предварительных исследований им были известны высокие задерживающие (сорбционные) свойства пород по отношению к нуклидам-компонентам отходов, имелся опыт США по сбросу жидких РАО в приповерхностные грунты в Хэнфорде, также показавший задержку распространения нуклидов породами. Однако, в отличие от применявшихся подходов в США, геологами-нефтяниками Калининым Н. А. и Барановым М. Н. было предложено использовать для удаления отходов глубокозалегающие пласты-коллекторы, надежно изолированные от поверхности слоями глинистых пород.

К тому времени имелся опыт возврата в недра попутных вод нефтяных месторождений, в США, Германии и других странах применялось захоронение в глубокозалегающие кол-

лекторские горизонты жидких нерадиоактивных отходов. В то же время жидкие РАО подобным способом за рубежом не захоранивались, что было обусловлено отсутствием соответствующих геологических условий в местах размещения предприятий и исследовательских центров атомной промышленности США (Хэнфорд, Саванна-Ривер, Ок-Ридж и др.).

Научно-технические предложения о предпосылках и организации работ по захоронению жидких РАО были рассмотрены и одобрены на Научно-Техническом Совете Министерства среднего машиностроения под председательством академика И. В. Курчатова.

В основе сформулированных в то время концептуальных положений глубинного захоронения жидких РАО могут быть приведены пять основных идей или научных мнений:

- имеется принципиальная возможность использования для захоронения жидких РАО некоторых типов геологических формаций;

- захоронение жидких РАО может быть осуществлено только в определенных геологических условиях, удовлетворяющих ряду требований;

- осуществлению захоронения должно предшествовать изучение геологической среды и отходов, объем получаемых научных данных должен обеспечивать достаточно надежное прогнозирование последствий захоронения;

- захораниваемые отходы должны быть совместимы с геологической средой;

- проведение захоронения и протекающие в недрах процессы должны контролироваться, режимы нагнетания отходов должны в минимально-возможной степени изменять естественные условия геологических формаций.

Первым требованием к геологической среде и к технологии захоронения, вытекающим из этих концептуальных положений, являлось локализация жидких РАО в определенных границах. Это требование соответствовало одному из основных положений горного права, в соответствии с которым при разработке полезных ископаемых или использовании недр в других целях область влияния должна быть ограничена горным отводом, оформляемым в установленном порядке.

Было ясно, что далеко не все геологические формации пригодны для захоронения жидких РАО, а только те, которые обладают необходимыми емкостными свойствами, позволяющими разместить отходы в поровом пространстве пород — в пласте-коллекторе на сравнительно небольшой площади. Пласты-коллекторы, пригодные для захоронения, должны быть изолированными от поверхности и неглубокозалегающими

вод толщами слабопроницаемых пород, обладающими водоупорными свойствами. Выше пласта-коллектора, отделенный от него водоупором, должен залегать буферный горизонт, также отвечающий требованиям, предъявляемым к пластам-коллекторам, и являющийся резервной емкостью между пластом-коллектором и неглубокозалегающими горизонтами.

В области возможного влияния захоронения не должны быть участки выклинивания или литологического замещения слабопроницаемых пород водоупоров, проницаемых зон тектонических нарушений, по которым возможно развитие перетоков.

Скорость естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе должна быть достаточно мала, чтобы распад нуклидов до безопасных содержаний произошел на сравнительно небольшом удалении от места захоронения, и оцениваться значениями нескольких метров в год.

Захоронение жидких РАО не может выполняться вблизи области разгрузки пласта-коллектора в вышележащие горизонты. Глубинное захоронение не должно препятствовать разработке месторождений полезных ископаемых, если таковые имеются в районе.

Необходимо, чтобы направляемые на захоронение отходы были совместимы с геологической средой. Их нагнетание не должно вызывать необратимые изменения пласта-коллектора, например снижение фильтрационных свойств, не позволяющих осуществлять захоронение, или интенсивный разогрев и газообразование в пласте-коллекторе, растворение породообразующих минералов.

Режимы нагнетания отходов не могут приводить к нарушению геодинамического равновесия геологической среды, что достигается ограничением верхнего предела давлений нагнетания. Основные инженерные сооружения — буровые скважины обеспечивают надежное разобщение пласта-коллектора от всех вышележащих горизонтов, их состояние должно контролироваться. Скважины — ремонтнопригодны, а после завершения эксплуатации должны ликвидироваться. Глубинное захоронение является контролируемым процессом, т.е. в каждый момент времени необходимо иметь необходимую информацию о поведении отходов в недрах, их местоположении и протекающих процессах.

Для выполнения всех этих требований следует получить оптимальный объем научного знания о геологическом строении и свойствах геологической среды в местах предполагаемого захоронения, характеристиках отходов и их взаимодействии с геологической средой. В распоряжении специалистов,

создающих системы захоронения, должны быть необходимые технические средства и методы исследований всех вопросов, связанных с захоронением, а объем и качество получаемых знаний должны быть такими, чтобы принимаемые практические решения были достаточно обоснованными, а последствия захоронения прогнозируемыми с достаточной долей уверенности. Основные концептуальные положения глубинного захоронения жидких РАО иллюстрируются таблицей 3.1.

При рассмотрении концептуальных положений, а также последующим их развитию в связи с новыми требованиями к охране окружающей среды и здоровья людей было обращено внимание и на ответственность перед последующими поколениями, которые в той или иной степени столкнутся с последствиями деятельности такого рода. Было высказано мнение, что участки недр, содержащие отходы, будут подобны месторождениям полезных ископаемых, в том числе радиоактивных минералов, с которыми человечество уже встречалось ранее и имеет опыт безопасного обращения.

Негативный характер последствий захоронения жидких РАО будет на несколько порядков меньше, чем при оставлении отходов на поверхности Земли в бассейнах, водоемах и хранилищах (а другого пути в период 60–80-х годов не было), неизбежно вызывающих облучение населения и возникновение генетических дефектов, исправление или нейтрализация которых вряд ли будут долгие годы выполнимыми и потребуют значительно больших усилий и затрат нашими потомками, чем ограничение пользование недрами в местах захоронения.

Таблица № 3.1

Концептуальные положения глубинного захоронения жидких РАО

Свойства геологических формаций	Совместимость отходов с геологической средой	Технология глубинного захоронения
1	2	3
В глубокозалегающих пористых породах (пластах-коллекторах) возможно размещение жидких РАО в пределах ограниченных объемов.	Размещение жидких РАО в геологической формации не приводит к развитию процессов, препятствующих захоронению и снижающих степень изоляции отходов.	Режимы захоронения жидких РАО не приводят к нарушению геодинамической устойчивости геологической среды: нарушению сплошности пласта-коллектора вызванной сейсмичности.

Свойства геологических формаций	Совместимость отходов с геологической средой	Технология глубинного захоронения
1	2	3
<p>Отходы изолируются в пределах устанавливаемых границ благодаря низкой проницаемости перекрывающих пласты-коллекторы слоев пород, обладающих водоупорными свойствами, и низких скоростей естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе</p> <p>Геологические формации, пригодные для захоронения жидких РАО, должны удовлетворять ряду требований.</p> <p>Осуществлению захоронения отходов предшествует изучение геологических формаций</p> <p>Геологические и экологические последствия глубинного захоронения прогнозируются с достаточной степенью надежности.</p>	<p>Взаимодействие жидких РАО с горными породами и подземными водами приводит к переходу радиоактивных нуклидов-компонентов РАО в твердую фазу — в горные породы.</p> <p>В результате захоронения жидких РАО в пластах-коллекторах образуются залежи компонентов РАО, представляющие собой техногенные месторождения.</p>	<p>Конструкции и технология сооружения скважин обеспечивают изоляцию всех пересекаемых скважиной горизонтов от пласта-коллектора. После окончания захоронения скважины ликвидируются.</p> <p>В районе захоронения жидких РАО устанавливаются границы горного отвода недр и санитарно-защитных зон, в пределах которых ограничивается пользование недрами.</p> <p>Процессы захоронения и распространения отходов в геологической среде контролируются.</p>

Рассматривалась также проблема времени гарантированной локализации отходов в недрах. Первоначально было принято, что этот период определяется временем распада нуклидов — продуктов деления до безопасных содержаний и составляет в зависимости от концентраций и состава нуклидов от 300 до 1000 лет. Однако то обстоятельство, что в отходах содержатся стабильные компоненты (например, соли), также являющиеся загрязнителями, и неизвлекаемые микроконцентрации долгоживущих нуклидов, заставило позднее несколько иначе оценить временной фактор локализации отходов. Если связать длительность локализации отходов в недрах с прогрессом или, наоборот, регрессом общества, то период времени необходимой локализации оценивается значениями 1 тыс. и 10 тыс. лет.

Не был обойден вниманием и вопрос о безопасных уровнях содержаний радиоактивных нуклидов — компонентов РАО в геологической среде. Первоначально принимались в качестве безопасных допустимые содержания нуклидов в питьевой воде в соответствии с действующими санитарными нормами радиационной безопасности. В связи с тем, что подобные нормы носят временный характер и могут изменяться, в последующем было предложено в качестве безопасного уровня нуклидов в геологической формации принимать величину флуктуации естественных содержаний урана, радия, тория, калия-40 в горных породах и водах (без рудных концентраций) с учетом относительной биологической опасности нуклидов — продуктов деления и естественных радиоактивных элементов.

Представленные концептуальные положения были рассмотрены и одобрены правительством.

В июне 1957 г. приказом Министра среднего машиностроения (№ 317с от 04.06.57 г.) в Институте ВНИПИпромтехнологии была создана специализированная научно-исследовательская лаборатория № 5 (НИЛ-5), на которую были возложены задачи проведения исследований, разработка проектно-сметной документации на строительство подземных хранилищ жидких радиоактивных отходов и внедрение данного способа обращения с РАО на предприятиях отрасли. Хронологически, в различные годы эту лабораторию возглавляли Н. А. Калинин, М. К. Пименов, Ф. П. Юдин, А. И. Рыбальченко.

Для изучения и исследования отдельных направлений этой сложной комплексной проблемы на различных этапах работы привлекались специализированные научно-исследовательские, производственные, проектные и конструкторские организации Академии наук Госстроя, Мингео, Минздрава, Минвуза СССР и др. ведомств.

В 1958 г. по предложению Министерства среднего машиностроения и Министерства геологии Правительством СССР было издано Распоряжение (№ 3019рс от 13.09.58 г.), подписанное А. Н. Косыгиным, о проведении геолого-разведочных работ и других исследований по проблеме глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов на Сибирском химическом комбинате (Томск-7), Горно-химическом комбинате (Красноярск-26), Комбинате «Маяк» (Челябинск-65) и Научно-исследовательском институте атомных реакторов (г. Димитровград).

К проведению работ по созданию систем глубинного захоронения жидких РАО были привлечены специализированные организации Министерства геологии (ныне Роскомнедра), проводившие геолого-разведочные работы под руководством

К. И. Антоненко и в последующем Ю. С. Татарчука, Б. В. Графского, Е. И. Чаповского.

Институтом физической химии Академии наук был выполнен большой объем исследований отходов, горных пород и их совместимости. Работы возглавлялись непосредственно директором института академиком В. И. Спицыным и руководителем специализированной лаборатории В. Д. Балуковой.

Обеспечение санитарно-радиационной безопасности захоронения являлось главной задачей, для решения которой были выполнены оценки возможного влияния захоронения жидких РАО на природную среду, прогнозирование последствий захоронения, определены гигиенические условия использования земель и недр в возможных местах захоронения. Это направление работ осуществлялось организациями Министерства здравоохранения и Институтом Биофизики под руководством А. С. Белицкого и А. И. Рыжова.

Обоснования и проектные работы, прогнозирование режимов и последствий эксплуатации конкретных установок Сибирского химического и Горно-химического комбинатов, Научно-исследовательского института атомных реакторов были выполнены в Институте ВНИИПромтехнологии под руководством главного инженера Е. Д. Мальцева, М. К. Пименова, Ф. П. Юдина.

В проектных материалах системы или установки глубокого захоронения жидких РАО получили наименование полигонов, а пласт-коллектор именовался как подземное хранилище. В последующем эти термины употреблялись наряду с другими.

Все работы по созданию и эксплуатации системы захоронения контролировались непосредственно Правительством и уполномоченными на то государственными органами путем проведения экспертиз с привлечением ведущих специалистов различных ведомств, комиссионных проверок, рассмотрения на НТС Министерств и т.д.

3.2. ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ

Первым объектом, на котором были начаты геолого-разведочные работы, являлся Сибирский химический комбинат (г. Томск-7), расположенный в юго-западной части Западно-Сибирской плиты, центральные и северные области которой были известны как перспективные нефтегазовые речоны.

Их геологический разрез включает коллекторские горизонты, представленные, в основном, песчаными породами, способными вмещать и удерживать жидкие и газообразные углеводороды, и флюидоупоры — толщи глинистых пород, являющиеся покрышками для этих залежей. Из фондовых материалов было известно, что в районе комбината мощность песчано-глинистых отложений, залегающих на кристаллическом фундаменте, составляет несколько сот метров и представлена меловыми и палеогеновыми отложениями, однако сведения об их составе, коллекторских и фильтрационных свойствах носили весьма ориентировочный характер.

Геолого-разведочные работы были начаты в 1958 г. геологической партией Новосибирского территориального геологического управления, в последующем переданной в состав Всесоюзного гидрогеологического треста (позднее Второе геологическое управление, ГГП Гидроспецгеология). Работы осуществлялись геологами-выпускниками Томского политехнического института А. Т. Ларченко и Р. А. Ларченко, Н. Н. Тищенко, А. И. Горбуновым, Е. Р. Макаровым под руководством ведущих специалистов ГГП Гидроспецгеология Б. Н. Саввина, Н. А. Титова, В. М. Даниловича. В работах принимали участие сотрудники созданной геологической службы Сибирского химического комбината М. Н. Баранов, В. П. Солопов, Л. Ф. Новоселов.

В соответствии с применявшимися методическими подходами при исследовании нефтяных регионов первым этапом геолого-разведочных работ являлось проведение электро- и сейсморазведочных работ, имевших задачу определения глубины залегания фундамента, его рельефа, предварительное расчленение разреза. Полученные материалы подтвердили наличие мощной толщи осадочных образований, предположительно включающих коллекторы и флюидоупоры, имеющих региональное развитие, залегание пластов с пологим наклоном к северо-западу, относительно слабую нарушенность фундамента тектоническими нарушениями.

Обсуждение результатов позволило принять решение о целесообразности проведения более детальных и, соответственно, дорогостоящих работ, включающих гидрогеологическую съемку масштаба 1:50 000, бурение скважин с полным комплексом геофизических исследований, отбором и изучением образцов пород, опытно-фильтрационные работы. Представления об объемах и видах геолого-разведочных работ дает таблица 3.2. Методика геолого-разведочных работ, проводившихся в целях обоснования глубинного захоронения жидких отходов и промстоков, достаточно подробно освещена в монографии

**Основные объемы и виды выполненных геолого-разведочных работ по предприятиям минатома РФ
для обоснования глубинного захоронения жидких РАО**

Таблица 3.2

№№ п/п	Наименование предприятий и полигонов глубинного захоронения	Сроки прове- дения работ, года	Основные виды и объемы выполненных работ							Стои- мость работ в период выпол- нения тыс. руб.
			Сейсмо- разведка, км ²	Электро- разведка, км ²	Гидрогео- логиче- ская съёмка, км ²	Объем буровых работ, пог. м	Число поисково- разве- дочных скважин, шт.	Опытные откачки (одинач- ные и ку- стовые), шт.	Опытные нагнета- ния (оди- ночные и кустовые) шт.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
76	I. Сибирский химкомбинат									
	1. Опытный полигон пл. 18									
	2. Экспериментальный полигон 18а	1957—1965	800	800	560	80.000	128	47	18	10.402.0
	3. Западный участок пл. 18а									
	II. Красноярский горно-химический комбинат									
	4. Полигон «Северный» (I горизонт)	1959—1963	1520	1520	150	35.000	77	12	10	3.210.0
	5. Полигон «Северный» (II горизонт)									
	6. Площадка XXVII-1	1964—1969	—	—	180	45.000	66	8	4	3.369.0
	7. Площадка XXVII-2									
	III. Комбинат «Маяк»									
	8. Теча-Бродская структура	1961—1965	350	350	350	37.000	47	5	1	4.557.0
	9. Архиповский грабен (район п. Уксянское	1969—1970	—	200	—	8.000	25	2	2	800.0
	IV. Научно-исследовательский институт атомных реакторов									
	10. Опытно-промышленный полигон	1962—1970	200	—	—	22.000	15	5	5	3.649.0

Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты (методические указания), Недра, М., 1976 г., и поэтому в данной книге рассмотрена вкратце [136, 137].

Результаты геолого-разведочных работ позволили стратифицировать разрез и осуществить его литологическое расчленение, выделить коллекторские и слабопроницаемые флюидоупорные (водоупорные) горизонты, обосновать гидрогеологическую схему района и определить напорный режим водоносных горизонтов, уклоны потока и естественные скорости движения подземных вод, значения которых составили 3—5 м/год. В итоге анализа материалов были построены корреляционные схемы и геолого-геофизические разрезы, погоризонтные карты различных характеристик: общих и эффективных мощностей горизонтов, водопроницаемости, глубины залегания кровли и подошвы горизонтов (структурные карты) и ряд других. Определения минералогического состава, пористости, фильтрационных свойств образцов пород, результаты их статической обработки были представлены в виде таблиц. Основные результаты геолого-разведочных работ более подробно охарактеризованы в главе 5, где приведены геологические схемы и разрезы для соответствующих полигонов захоронения жидких РАО.

Особое внимание было уделено определению фильтрационных свойств коллекторских горизонтов, условиям их изолированности от вышележащих водоносных. С этой целью были проведены длительные опытные нагнетания воды с наблюдением («прослушиванием») за пьезометрическими уровнями подземных вод опробуемого и вышележащих горизонтов, отделенных глинистыми слабопроницаемыми породами. Длительность нагнетания принималась 1—2 месяца, расход был сопоставим с нагнетанием отходов, что позволило получить достаточно представительные данные. На рис. 6 в качестве примера приведена схема опытно-фильтрационных работ по определению параметров коллекторских горизонтов и перекрывающих водоупорных образований.

Важным выводом по данным гидродинамических исследований явилось подтверждение разобщенности, в области возможного влияния захоронения, водонасыщенного комплекса меловых отложений, в которых были выделены перспективные II и III коллекторские горизонты, от комплекса верхнемеловых и палеогеновых отложений, между которыми залегал слабопроницаемый горизонт «Д». Об этом свидетельствовали результаты длительных нагнетаний, определения полей концентрации гелия, различия составов подземных вод.

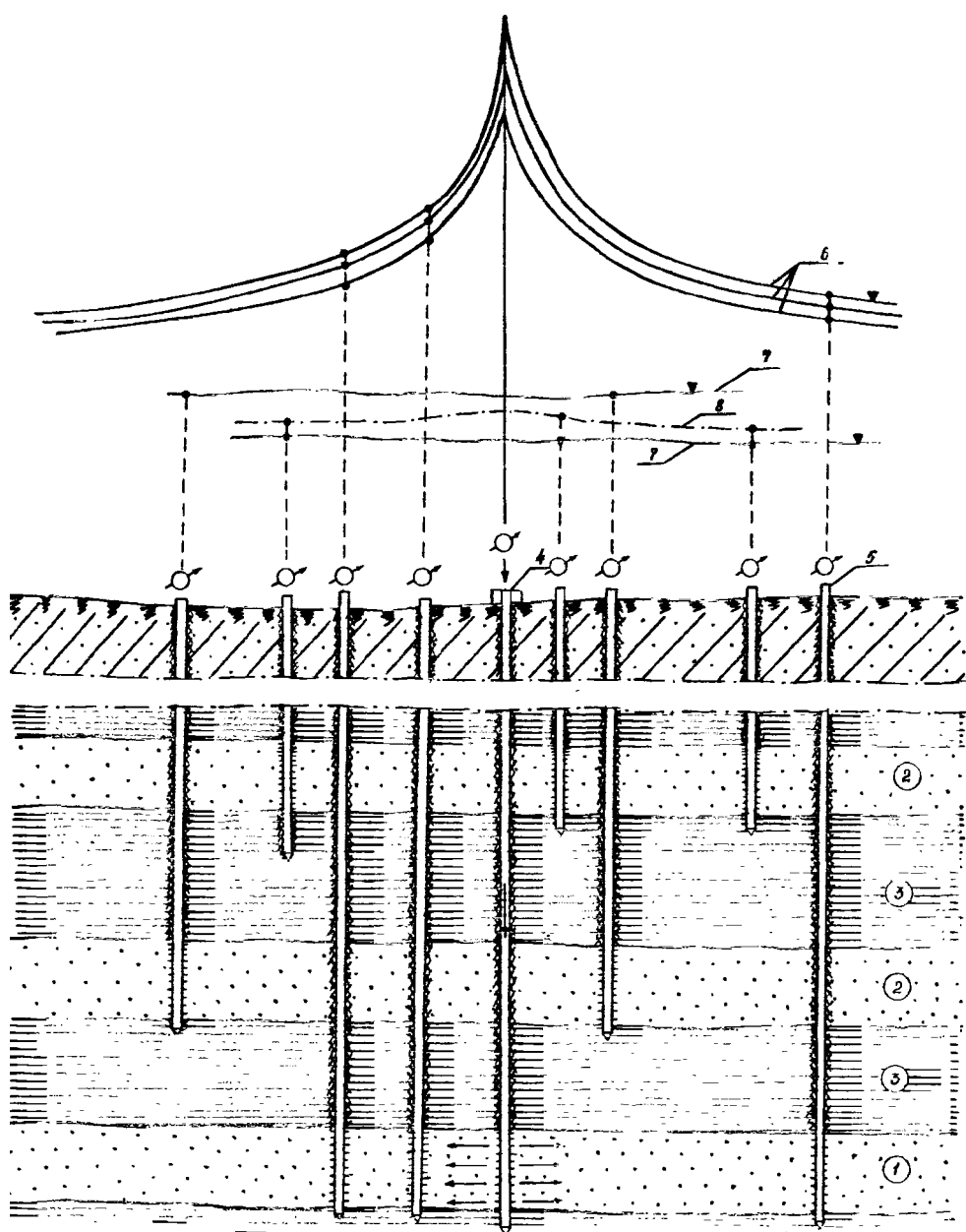


Рис. 6. Схема проведения опытно-фильтрационных работ

1—пласт-коллектор; 2—буферный и вышележащий горизонты; 3—слабопроницаемые породы; 4—центральная нагнетательная скважина; 5—наблюдательные скважины; 6—изменение давления (купол репрессии) в пласте-коллекторе для различных периодов времени; 7—положение уровня ПВ в вышележащих горизонтах; 8—изменение уровня при взаимосвязи горизонтов

Специальные работы были проведены на участке выявленной «ступени», примыкающей с востока к участкам предполагаемого захоронения и предположительно соответствующего тектоническому нарушению в фундаменте. По данным геолого-геофизической документации разведочных скважин, сеть которых была сгущена на этом участке, отмечалось пликативное (без нарушения сплошности) залегание коллекторских и слабопроницаемых слоев, образующих структуру, имеющей характер флексуры. Опытные нагнетания воды подтвердили сохранение изолирующих свойств водоупорных образований на этом участке.

В проведении гидродинамических исследований принимали участие ведущие в тот период времени специалисты по исследованию и разработке нефтяных месторождений Института ВНИИнефть под руководством Н. А. Васильевского.

Вертикальная фильтрационная неоднородность горизонтов изучалась с применением радиоактивных индикаторов, растворы которых нагнетались в скважины. Последующий радиоактивный каротаж позволял получить профиль проницаемости исследуемых горизонтов. Соответствующее внимание было уделено изучению геолого-технических условий сооружения скважин для выбора оптимальных конструкций, технологии бурения, крепления и освоения. Для контроля технического состояния скважин было разработано соответствующее приборное и методическое обеспечение.

Результаты геолого-разведочных работ были оформлены в виде отчетов, одним из выводов которых являлось заключение о принципиальной возможности осуществления глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в исследованном районе. Материалы отчетов были рассмотрены в организациях Министерства геологии с привлечением экспертов и признаны пригодными для использования в практических целях — для обоснования и проектирования полигонов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината.

Геолого-разведочные работы в районе Горно-химического комбината (г. Красноярск-26) были начаты несколько позже, в связи с чем имеющийся опыт проведения подобных работ был учтен при их организации, что позволило отказаться от некоторых видов исследований на предварительной стадии. Особенностью геологических условий в этом районе являлось залегание толщи песчано-глинистых отложений, содержащих коллекторские и водоупорные образования преимущественно средней и верхней юры, в синклинальной структуре (мульде) образованной погружением фундамента. С запада синклиналь-

ная структура ограничивалась тектоническим нарушением с амплитудой ступени в фундаменте 200–250 м. Как было установлено в дальнейшем, плоскость тектонического нарушения является гидравлическим экраном между приподнятым и опущенным блоком.

Подобные геологические условия были весьма благоприятными для захоронения отходов, плотность которых больше, чем подземных вод коллекторских горизонтов, что связано с синклинальным характером залегания слоев и ограниченностью структуры в плане. С другой стороны, приуроченность участка в зоне сочленения Сибирской платформы с Западно-Сибирской плитой, наличие тектонического нарушения в зоне влияния захоронения требовали детальных исследований геологических условий.

Геолого-разведочные работы были начаты в 1958 г. партией Красноярского территориального геологического управления, геологами А. В. Гончаровым, А. В. Носухиным, В. Т. Рыженковым и др. В последующем на базе партии было организовано специализированное геологическое предприятие под руководством М. М. Полякова, подчинявшееся ПГО Гидроспецгеологии. Геофизические исследования проводились под руководством Г. П. Понсуй-Шапко, И. Т. Гаврилова.

Методика исследований в целом была аналогична применявшейся на Сибирском химическом комбинате. Разобщенность выделенных в качестве коллекторов I и II горизонтов от вышележащих глинистыми водоупорами была подтверждена на основании длительных откачек и нагнетаний при наблюдениях за пьезометрической поверхностью всех вскрываемых горизонтов, определениями содержания гелия.

Специальные исследования были проведены для установления экранирующих свойств плоскости тектонического нарушения.

В исследовании отдельных вопросов, возникавших при проведении геолого-разведочных работ, принимали участие специалисты МГУ, ВСЕГИНГЕО и других институтов и организаций.

Геолого-разведочные работы не ограничивались только синклинальной структурой, но проводились и на левом берегу р. Енисей, где мощность осадочных образований окраинной части Западно-Сибирской плиты резко увеличивалась.

Участок синклинальной структуры был признан наиболее пригодным по условиям безопасности для осуществления захоронения. В связи с закрытостью структуры рекомендовалось осуществлять разгрузку коллекторских горизонтов путем извлечения чистой воды одновременно с нагнетанием отходов. Местоположение нагнетательных и разгрузочных скважин необходимо было выбрать таким образом, чтобы не произошло

загрязнения извлекаемых вод. Опытные работы, проведенные в составе геолого-разведочных, подтвердили возможность подобного режима захоронения.

Результаты и выводы геолого-разведочных работ были одобрены ведущими специалистами Министерства геологии и признаны пригодными для проектных проработок.

Геологические условия третьего объекта — Научно-исследовательского института атомных реакторов (г. Димитровград Ульяновской обл.) были существенно отличными от двух выше рассмотренных.

Разведваемый участок приурочен к нефтеносному региону среднего Поволжья, в связи с чем еще до начала работ были известны коллекторские свойства глубокозалегающих горизонтов (более 1000 м), содержащих соленые воды (рассолы). В разрезе был выделен и относительно хорошо изучен региональный флюидоупор верейских отложений, распространенных практически повсеместно в пределах Русской платформы.

Перед геолого-разведочными работами стояли задачи выделения наиболее перспективных коллекторских горизонтов ниже верейских отложений, подтверждение их изолирующей способности, определению емкостных и фильтрационных свойств коллекторов, изучение геолого-технических условий сооружения скважин.

С целью изучения структурных особенностей участка были проведены сейсморазведочные работы, позволившие получить структурные схемы отражающих и преломляющих горизонтов, характеризующих условия залегания коллекторов и водоупорных толщ.

Бурение скважин и комплекс геолого-геофизических исследований позволили провести стратификацию и литологическое расчленение разреза, выделить два коллекторских горизонта: терригенные отложения III проницаемой зоны (глубина 1440—1550 м) и карбонатные отложения IV проницаемой зоны (глубина 1130—1410 м) среднего карбона. Было подтверждено присутствие в разрезе верейского водоупорного горизонта, его водоупорные свойства. Опытные откачки и нагнетания показали принципиальную возможность использования выделенных горизонтов для удаления жидких радиоактивных отходов. Результаты геолого-разведочных работ были также одобрены Министерством геологии.

В последующем геолого-разведочные работы на 3 участках были дополнены исследованиями полей концентраций гелия и изотопными определениями подземных вод, геофизическими исследованиями, подтвердившими ранее сделанные выводы о геологических условиях.

Геолого-разведочные работы с целью обоснования глубинного захоронения жидких РАО были также проведены в районе ПО «Маяк» (Челябинск-40), Игналинской, Калининской, Смоленской, Нововоронежской АЭС.

Район ПО «Маяк» по геологическим условиям оказался непригодным для захоронения жидких РАО. В осадочном комплексе Тече-Бродской структуры были выделены закарстованные известняки, изолированность которых от вышележащих горизонтов подземных вод не была доказана. Ближайший участок, пригодный для захоронения жидких РАО, разведан на расстоянии 150 км к востоку от предприятия в пределах переходной зоны к Западно-Сибирской плите (Курганская обл., пос. Уксянское). Коллекторские горизонты здесь приурочены к песчано-глинистой толще триаса, выполняющей синклиналичную структуру в фундаменте, образованную предположительно древним руслом. На основании геолого-разведочных работ было разработано ТЭО захоронения жидких РАО. В связи со значительной удаленностью участка от предприятия решение о создании системы захоронения принято не было.

Геолого-разведочные работы в районе Игналинской и Смоленской АЭС показали перспективность геологических условий для захоронения жидких РАО и были использованы для разработки ТЭО. Однако, ввиду ограниченных объемов отходов АЭС и развитием в конце 70-х—начале 80-х годов антиядерного движения, было принято решение о применении технологии отверждения РАО АЭС. Положительные результаты были также получены для района энергозавода в г. Шевченко (Мангышлак), однако по ряду причин система захоронения там создана не была.

Работы в районе Калининской АЭС первоначально проводились для захоронения жидких РАО. В последующем было принято решение об их отверждении. На глубинное захоронение было предложено направлять солевые растворы химводоподготовки в объеме 100—1500 м³/сут, сбрасывавшиеся в поверхностные водотоки. В 1990—93 гг. на основании разработанной проектной документации осуществлялось строительство полигона захоронения.

Результаты разведки участка Нововоронежской АЭС не позволили получить убедительные данные об изолированности выделенных коллекторских песчаных горизонтов, залегающих на склоне Воронежского кристаллического массива. В качестве возможного пласта-коллектора в районе Ленинградской АЭС был выделен гдовский горизонт, являющийся резервным источником водоснабжения для областного центра и разгружающегося под дном Балтийского моря. Эти обсто-

яательства обусловили отказ от захоронения жидких РАО Нововоронежской и Ленинградской АЭС.

В связи с созданием нового радиохимического производства на Горно-химическом комбинате (завод РТ-2) в 1980—1985 гг. была проведена доразведка участка на левом берегу р. Енисей в составе электро- и сейсморазведочных работ, бурения скважин с полным комплексом исследований, изотопно-геохимические исследования, длительные опытные скачки и нагнетания. Были получены положительные результаты, выявлены песчаные коллекторские горизонты в интервалах глубин 660—1000 м, надежно изолированные от поверхности. Особенности рекомендованного участка пл. 27 являются приуроченность основного коллекторского минжульского горизонта средней юры к пласту-полосе шириной 3—4 км, ограниченного с юго-запада и северо-востока зонами литологического замещения песков на глины, наличие мощной толщи глинистых слабопроницаемых пород с поверхности до кровли первого пласта-коллектора, залегающего на глубинах около 660 м.

Подобные геологические условия, а также низкие скорости естественного движения подземных вод и высокие сорбционные свойства пород коллекторских горизонтов обуславливают достаточную надежность локализации захораниваемых жидких РАО. Тем не менее необходимость передачи на захоронение РАО по трубопроводу, который предполагалось располагать в туннеле под рекой Енисей, вызвала протесты общественности, выразившей сомнение в безопасности такой транспортной системы, что послужило основной причиной отказа от создания полигона захоронения.

Опыт проведения геолого-разведочных работ и обсуждения их результатов, последующее обоснование, проектирование, строительство и эксплуатация систем захоронения позволили сформулировать и уточнить общие требования к геологическим формациям, пригодным для захоронения жидких РАО.

Первым наиболее важным требованием является изолированность выбранного для размещения отходов геологического образования от поверхности и неглубокозалегающих пресных подземных вод, использование которых может быть перспективно для целей водоснабжения. Требование изоляции может быть отнесено и к минерализованным бальнеологическим водам, если таковые имеются. Изолированность должна быть обеспечена не только по вертикали, но и по горизонтали от сопредельных участков выбранного геологического образования.

Это требование будет выполнено если, используемое геологическое образование (пласт-коллектор) перекрывается

достаточно мощной толщей слабопроницаемых пород, в частности глинистого состава, а скорость естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе невелика. Количественные характеристики устанавливаются и уточняются в каждом конкретном случае. По имеющемуся опыту мощность перекрывающих пласт-коллектор слабопроницаемых пластов должна быть не менее нескольких десятков метров, их коэффициенты фильтрации $10^{-3} - 10^{-4}$ м/сут и менее, скорость естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе не более 10 м/год.

Важным фактором, способствующим изоляции отходов, являются процессы их взаимодействия с геологической средой, приводящие к переходу компонентов отходов в твердую фазу — горные породы, наличие буферного горизонта выше пласта-коллектора, сплошность залегания водоупора и отсутствие в нем литологических окон, проницаемых зон тектонических нарушений, фильтрационная однородность пласта-коллектора, т.е. отсутствие зон аномально высокой проницаемости.

Следующим важным требованием являются достаточные емкостные свойства пласта-коллектора, позволяющие размещать достаточные объемы отходов в пределах ограниченных участков. Удельная емкость пласта-коллектора оценивается объемом отходов, который может быть размещен на единице площади пласта-коллектора. Удельная емкость определяется как произведение эффективной мощности пласта на эффективную пористость. Эффективная мощность определяется как сумма проницаемых слоев пласта-коллектора, заполняемых отходами, эффективная пористость определяется долей объема пород, приходящегося на открытые поры, заполняемые отходами. Удельная емкость по жидкой фазе (компоненты, находящиеся в растворе и не взаимодействующие с породами) оценивается значениями 0,5—10 куб.м отходов на кв.м пласта (или 5—100 тыс.куб.м отходов на 1 га пласта), что соответствует мощности 10—100 м при пористости 0,05—0,2.

Важным требованием является также возможность достоверного определения геологического строения и свойств геологических формаций, которые являются основой для получения реальных прогнозов поведения отходов в недрах и последствий их захоронения. Это требование выполняется для геологических образований с монотонным изменением свойств и характеристик — песчано-глинистых осадочных образований с равномерно распределенной пустотностью (пористостью), в которых слабо развиты тектонические структуры, имеющие, в основном, пликтивный характер. Удовлетворяют этому требованию и некоторые типы карбонатных коллекторов с двойной пористостью. Геологические разрезы подобных об-

разований, непосредственно определяемые в отдельных точках — буровых скважинах, удовлетворительно коррелируются между собой, что дает возможность интерполяции получаемых характеристик. Создаваемые при опытных работах (откачках и нагнетаниях) возмущения пьезометрической поверхности подземных вод распространяются на большие площади, что также дает возможность получать представительные данные. В то же время скальные породы с преобразующим трещинным типом пористости, кавернозные карбонатные породы являются весьма сложными объектами для их исследования, а получаемые данные характеризуются большой неопределенностью.

Необходимым требованием является также возможность сооружения скважин необходимой надежности. Развитие карста в верхней части разреза может явиться причиной высокой аварийности при сооружении скважин, недоподъема цементного раствора при их креплении, в результате чего скважины не будут обеспечивать необходимую изоляцию пласта-коллектора от вышележащих горизонтов.

Приведенные основные требования обуславливают и ряд других: размещение пластов-коллекторов в гидродинамической зоне затрудненного водообмена, гидрохимическая зональность этажно-залегающих горизонтов и т.д.

В таблице 3.3. приведены основные требования к геологическим формациям, пригодным для захоронения жидких РАО, определяющие характеристики геологической среды и способы их изучения.

Т а б л и ц а 3.3

Требования к геологическим формациям, пригодным для захоронения жидких РАО, и методы исследования

№№ п/п	Общие характеристики геологических формаций	Определяющие параметры и их возможные значения	Методы исследований
1	2	3	4
1.	Изолированность коллекторских горизонтов от неглубокозалегающих горизонтов пресных вод слабопроницаемыми породами, обладающими водоупорными свойствами	Коэффициенты фильтрации водоупоров $10^{-3} - 10^{-4}$ м/сут; мощность $30 \div 40$ м и более; отсутствие литологических и тектонических фильтрационных «окон» в области влияния захоронения	Бурение скважин с полным комплексом ГИС, исследование образцов пород, ОФР, гидрохимические исследования (гелиевая съемка, изотопные определения, изучение гидрохимии подземных вод)

№№ п/п	Общие характеристики геологических формаций	Определяющие параметры и их возможные значения	Методы исследований
1	2	3	4
2.	Низкие скорости естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе	Естественные скорости подземных вод в пласте-коллекторе, не превышающие 10 м/год	Установление пьезометрической поверхности подземных вод на основании режимных наблюдений в скважинах, определение фильтрационных свойств по данным ОФР
3.	Достаточные емкостные свойства пласта-коллектора	Удельная емкость по жидкой фазе $>0,5$ куб. м отходов на 1 кв. м пласта, эффективная мощность 10–200 м, пористость $>0,05$, сорбционная задержка нуклидов породами	Комплексные исследования скважин и образцов пород, ОФР и ОМР
4.	Наличие буферного горизонта между пластом-коллектором и неглубокозалегающими горизонтами пресных подземных вод	Мощность горизонта >10 м, пористость $>0,05$ м, фильтрационные свойства близки к пласту-коллектору	Аналогичные п. 1
5.	Отсутствие зон разгрузки коллекторских горизонтов, активных тектонических разломов в области возможного влияния глубинного захоронения	Указанные зоны и структуры должны отсутствовать в радиусе 10–15 км от полигона захоронения	Площадные геофизические исследования, гидрогеохимические исследования, исследование неотектонической структуры, комплексный анализ геологических материалов
6.	Отсутствие месторождений полезных ископаемых в области влияния глубинного захоронения	Нефтегазовые месторождения, приуроченные к используемым для захоронения горизонтам, не должны располагаться ближе 15–20 км от полигона, залегающие в других горизонтах — на расстояниях 10–15 км	Комплексный анализ геологических материалов

Примечание: ГИС — геофизические исследования скважин;
ОФР — опытно-фильтрационные работы;
ОМР — опытно-миграционные работы.

3.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТХОДОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ С ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ

Основные направления физико-химических исследований при решении проблемы захоронения жидких радиоактивных отходов были определены на основе предварительного прогноза изменения физико-химических и геохимических условий геологических формаций при заполнении их порового пространства отходами. При поступлении жидких РАО в пласт-коллектор происходит нарушение геохимического равновесного природного состояния, что вызывает физико-химические реакции, приводящие к изменениям в составе жидкой и твердой фаз. При этом наиболее легко изменяется кислотно-основная среда раствора. В конечном итоге любой исходный раствор стремится к равновесному состоянию для пластовых условий.

Важным фактором, определяющим принципиальную возможность удаления жидких РАО, является характер протекания физико-химических процессов при установлении новых геохимических равновесий. Поэтому физико-химические свойства отходов, их химический и радиохимический состав, изменения свойств отходов при заполнении ими пласта-коллектора имеют большое значение. Физико-химические свойства отходов должны обеспечивать устойчивую работу нагнетательных скважин и предупреждать кольматацию прилегающих к прифилтровой зоне участков пласта-коллектора, способствовать переходу загрязнений и радионуклидов в твердую фазу и задержке миграции компонентов отходов пористой средой пласта-коллектора.

Решение физико-химических вопросов глубинного захоронения жидких РАО связано с проведением комплекса работ, включающих изучение:

- химического состава и физико-химических свойств отходов и горных пород;

- поведение компонентов отходов при взаимодействии с пластовыми водами и горными породами, включая изменение химического и фазового состава отходов в пласте, а также изменения в составе и свойствах материала пласта-коллектора при длительном контакте с отходами;

- процессов, связанных со спецификой жидких РАО — наличием радиоактивных нуклидов.

Физико-химические исследования вышеуказанных процессов выполнялись в Институте физической химии Академии наук с начала 60-х годов под руководством академика В. И. Спицына и заведующей лабораторией В. Д. Балуковой [38], причем, если на начальной стадии необходимо было доказать

принципиальную возможность глубинного удаления РАО и обосновать требования к отходам, то в последующем, в связи с ужесточившимися требованиями обоснования захоронения, исследования проводились в направлении создания соответствующего физико-химического состояния отходов в пластах-коллекторах, обеспечивающего удаление отходов в проектно-режиме и иммобилизацию их компонентов.

Первой задачей, которую требовалось решить при физико-химических исследованиях, являлось обеспечение совместимости захораниваемых отходов с геологической средой пласта-коллектора. Несовместимость отходов с геологической средой могла проявиться как кольматация (забивка) порового пространства пласта-коллектора мелкодисперсными твердыми веществами (взвесями), содержащимися в отходах или образующимися при их контакте с породами и подземными водами. Несовместимость отходов может возникнуть и при развитии процессов, существенно осложняющих проведение захоронения или создающих предпосылки аварийных ситуаций: перегрев пласта-коллектора, интенсивное газообразование, растворение пластового материала.

Изучение совместимости с геологической средой включало многочисленные экспериментальные исследования по выявлению условий, при которых химическое взаимодействие между отходами и породами пласта-коллектора и пластовой водой приводят к нежелательным явлениям, и способов предупреждения этих явлений.

Работы по изучению процессов взаимодействия отходов с образцами пород проводились в статических и динамических условиях с использованием модельных и реальных растворов и образцов пород пластов-коллекторов, отобранных при бурении скважин.

Фильтрационные опыты в динамических условиях проводились на специально изготовленных фильтрационных колонках, позволяющих имитировать давление, температуру, движение растворов с различными скоростями. В результате опытов, проведенных в динамике, установлены пределы по содержанию взвешенных веществ в удаляемых отходах. В дальнейшем при анализе работы нагнетательных скважин было уточнено предельное количество взвешенных веществ, которое при попадании в пласт в виде взвесей приводит к снижению скорости фильтрации отходов. Предел фильтруемости отходов в пористой среде пласта-коллектора соответствует снижению коэффициента фильтрации растворов через образцы пород в два и более раз.

К такому снижению коэффициента фильтрации может привести также образование труднорастворимых осадков, выпадающих из отходов вблизи прифильтровой зоны нагнетательных скважин. Это могут быть осадки катионов металлов самих отходов и катионов металлов, выщелачиваемых отходами из пород. И то и другое является нежелательным и предотвратить это можно при обеспечении фазовой стабильности жидких РАО (гомогенной устойчивости) и при условии снижения количества выщелачиваемых компонентов за счет уменьшения агрессивного воздействия отходов на породы.

При контакте содержащих азотную кислоту растворов (0,3 М) с породами пласта-коллектора, которые представлены полиминеральной смесью, происходит существенное изменение химического состава, кислотно-основных и окислительно-восстановительных свойств, фазового состояния. При действии азотной кислоты на образцы пород выщелачиваются катионы кальция и магния, в раствор переходят также катионы железа, алюминия. За счет расходования азотной кислоты на взаимодействие с породами происходит постепенная нейтрализация раствора до значения рН 4÷7. Экспериментально установлено, что при рН более 7 выпадают в осадок гидроксиды таких катионов металлов, как железо, хром, алюминий, марганец.

Удаляемые в глубинный пласт-коллектор жидкие РАО в кислой среде должны соответствовать определенным требованиям, обеспечивающим непрерывную работу нагнетательных скважин в течение установленного периода времени, химическое взаимодействие отходов с породами пласта-коллектора не должно приводить к разрушению последних. С этой целью было предложено осуществлять предварительную подготовку перед захоронением как отходов, так и пласта-коллектора, применять порционное удаление жидких РАО в кислой среде с последующим оттеснением растворами от скважины.

На основании лабораторных и экспериментальных данных и опытно-промышленных работ были разработаны основные требования к жидким РАО различного типа, направляемым на захоронение, которые заключаются в следующем:

- регламентирование содержания взвешенных веществ в зависимости от характеристик пласта-коллектора;

- регламентирование состава отходов с целью предотвращения процессов осадко- и газообразования в прифильтровой зоне скважин;

- установление «пороговых» концентраций компонентов отходов, агрессивных по отношению к породам пласта-коллектора;

—ограничение содержания долгоживущих и наиболее энерговыделяющих нуклидов с учетом возможного разогрева пласта-коллектора.

Для обеспечения вышеперечисленных требований была разработана технология подготовки жидких РАО к подземному захоронению, которая включает ряд таких приемов, как отделение взвесей путем отстаивания или фильтрации, предварительная химическая обработка отходов, предварительная обработка прифильтровой зоны нагнетательных скважин.

Требования к подготовленным к захоронению отходам отличаются в каждом конкретном случае и зависят от состава и свойств отходов, характеристик пласта-коллектора, режимов удаления отходов. Наиболее общими требованиями являются ограничения содержания мелкодисперсных твердых частиц, которые принимаются от 5 до 100 мг/л, ограничение содержания компонентов, способных образовывать слаборастворимые соединения при относительно небольших изменениях физико-химических характеристик отходов, кислотно-основных характеристик отходов, близких к нейтральным (отходы могут быть слабокислыми или слабощелочными).

На начальном этапе глубинного захоронения жидких РАО для улучшения экологической обстановки в районе предприятий в пласты-коллекторы направлялись декантаты открытых наземных хранилищ, которые представляли собой солевые системы (в основном нитрат натрия) с нейтральным или слабощелочным значением рН. Специальной подготовки для этих отходов не требовалось.

По мере совершенствования основного технологического процесса перечень отходов, направляемых на захоронение, значительно расширился. При этом состав отходов и их свойства стали более сложными. Необходимым условием захоронения таких отходов стала предварительная подготовка, технология которой разрабатывалась в Институте физической химии Академии наук.

На основании экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, проверки на реальных растворах, результатов опытно-промышленных опробований было сформировано мнение, что в практике технологической подготовки целесообразны следующие приемы:

—коагуляция легкогидролизующихся катионов металлов (железа, хрома, никеля), корректировка значения рН среды, отстаивание;

—использование комплексообразующих реагентов для получения устойчивых растворов, образование твердой фазы в которых протекает при более высоких значениях рН;

— применение специфических реагентов, например поверхностно-активных веществ, позволяющих удалять отходы с различным поверхностным натяжением, вязкостью.

При коагуляции из жидких РАО следует выводить только те компоненты, которые способны за счет процессов гидролиза или образования слаборастворимых соединений образовывать осадки в прифилтровой зоне нагнетательных скважин. В связи с этим для различных составов отходов подбираются такие композиции реагентов (коагулянтов), которые обеспечивают безопасный уровень концентрации осадкообразователей.

Стадию коагуляции можно заменить введением в отходы комплексообразующих реагентов, хелатные соединения которых с легкогидролизуемыми компонентами отходов, такими как железо, хром, хорошо растворимы в воде в широком интервале значений рН. При этом может быть увеличено количество захораниваемых загрязнений. Известен и достаточно изучен ряд комплексообразующих реагентов, которые можно было бы использовать для подготовки отходов к удалению в пласты-коллекторы. Однако в силу ряда причин, в частности доступности и стоимости, практическое применение нашел вариант с использованием уксусной кислоты, комплексообразующие свойства которой хорошо изучены. Помимо комплексообразующих свойств растворы, содержащие ацетат-ионы, обладают «буферными» свойствами, т.е. при нейтрализации до определенного значения рН, соответствующего переходу кислоты в ее соль, сохраняют постоянное значение рН, что особенно важно, т.к. это задерживает процесс осадкообразования в пластовых условиях и, следовательно, зона осадкообразования смещается от прифилтровой зоны нагнетательных скважин.

Разработана альтернативная технология, позволяющая при необходимости заменить уксусную кислоту на такие реагенты, как оксиэтилидендифосфоновая кислота, хромотроповая кислота, глиоксаль.

Однако экономически более целесообразно использовать для подготовки отходов не индивидуальные дорогие комплексообразующие реагенты, а какие-либо полупродукты или отходы химических производств, обладающие необходимыми свойствами.

В ИФХ РАН с этой целью была изучена возможность применения отходов Рубежанского и Ереванского химических комбинатов. Было установлено, что могут быть использованы те и другие отходы. Но практическая реализация была затруднена вследствие малой растворимости в воде отходов, а отходы Ереванского химкомбината, содержащие смесь изомеров винной и малеиновой кислот, стали перерабатываться для доизвлечения винной кислоты.

В настоящее время в ИФХ РАН проводятся исследования по изучению возможности применения отходов производства капролактама для подготовки различных жидких РАО к захоронению.

Особый методический подход был предложен для реализации щелочного варианта захоронения алюминатных отходов, основанный на амфотерных свойствах алюминия образовывать растворимые соединения в щелочной среде за счет возникновения комплексных анионов типа $[Al(OH)_4OH_2]^{3-}$.

В последние годы широко используется способ предварительной обработки прифилтровой зоны нагнетательных скважин растворами определенного состава и с последующим переходом к нагнетанию отходов, недостаточно совместимых с геологической средой. Этот вариант используется периодически для небольших объемов отходов, которые по составу или физико-химическим свойствам (вязкость, поверхностное натяжение, плотность) резко отличаются от основной массы отходов. Для ограниченных объемов отходов в ИФХ РАН и НИИАР (Меняйло А. А. и Ладзин А. С.) была разработана технология подготовки и захоронения растворов повышенной мутности с первоначальным содержанием и взвесей до 1,0 г/л [57].

Была также разработана технология создания «оторочек» в пластах-коллекторах, имеющая целью разделение отходов и подземных вод, недостаточно совместимых друг с другом.

Направляемые на ту или иную технологическую схему подготовки отходы любой категории контролируют по химическому, радиохимическому составу, при необходимости анализируют физико-химические свойства отходов, кислотно-основные и окислительно-восстановительные показатели, вязкость, плотность, поверхностное натяжение.

Перед удалением в пласт-коллектор проводится отбор проб с регламентированной периодичностью и перечнем анализируемых компонентов, а в случае несоответствия какого-либо параметра, отходы подвергают дополнительной переработке.

Для обоснования безопасности захоронения жидких РАО большое значение имеет задержка распространения радионуклидов в пласте-коллекторе в результате сорбционных процессов, приводящих к переходу нуклидов из жидкой фазы — фильтра отходов в поровом пространстве пласта-коллектора в твердую фазу — в минеральный скелет горной породы или в виде осадков на ее поверхности.

Под сорбционными процессами понимается группа физико-химических процессов, включающих абсорбцию и адсорбцию, хемосорбцию и ионный обмен. Кроме того, в поровой жидкости — фильтрате отходов и подземных водах могут образовываться осадки слаборастворимых соединений, захватывающие и соосаждающие нуклиды. Разделение этих процессов весьма затруднительно и для их характеристики обычно применяется обобщенный показатель — коэффициент межфазного распределения, равный отношению количества (активности) нуклида, содержащегося в твердой фазе — в породе, к его равновесному содержанию в поровой жидкости.

$$K_p = \frac{N}{C_0},$$

где: N — активность нуклида в породе, Ки/г; C_0 — активность поровой жидкости, Ки/см³.

Применяется также безразмерный коэффициент межфазного распределения K_d , равный

$$K_d = K_p \rho,$$

где: ρ — плотность породы, г/см³.

Задерживающие свойства пороа характеризуются эффективной пористостью n_e и фактором задержки R :

$$n_e = \frac{N\rho + C_0 n_0}{C_0} = K_d + n_0,$$

$$R = \frac{n_0}{n_e} = 1 + \frac{K_d}{n_0},$$

где: n_0 — активная или открытая пористость (пустотность) пороа.

Эффективная пористость, учитывающая процессы накопления нуклидов в пороах, физически представляет собой отношение общей активности нуклида в единице объема пороа (в поровом пространстве и в твердой фазе) к удельной активности в поровой жидкости. Фактор задержки характеризует отношение действительных скоростей перемещения в горных пороах воды и взаимодействующего с пороах нуклида. Например, при $K_p = 1$ см³/г, $\rho = 2$ г/см³, $n_0 = 0,15$ величина n_e составит 2,15 и $R \approx 14,3$, т.е. скорость перемещения нуклида под влиянием потока подземных вод будет в 14,3 меньше, чем частичек воды и компонентов, не взаимодействующих с пороах.

В общем случае принимается, что величина K_p не зависит от активности нуклида (линейная изотерма сорбции), а межфазное распределение носит равновесный характер, т.е. сколько

сорбировалось нуклида, столько же в последующем и десорбируется фильтрующей водой или раствором, не содержащим нуклиды.

Как показывают результаты исследований, первое допущение вполне приемлемо для небольших периодов контакта отходов с породами, что обусловлено микроконцентрациями нуклидов — компонентов отходов. В связи с этим насыщение сорбционных емкостей достигается лишь при активностях нуклидов несколько кюри и более. Так, 1 кюри стронция-90 весит 7,34 мг, цезия-137 — 11,5 мг. Их активность, для которой обычно проводятся миграционные расчеты, не превышает 10^{-5} Ки/л, что соответствует 0,07 мкг/л для стронция и 0,11 мкг/л для цезия. В то же время при длительном контакте отходов с породами происходит их «пропитка», в результате этого и вследствие диффузионных процессов увеличивается площадь контакта отходов с породами и, соответственно, возрастание значений K_p с течением времени.

Допущение о равновесности сорбционных процессов является условным и принимается для удобства расчетов миграции нуклидов. В действительности, как было показано в результате исследований, десорбируется только часть ранее сорбированного количества нуклида, оставшаяся часть переходит в растворы значительно медленнее в результате процессов выщелачивания.

Принятые допущения приводят к получению завышенных миграционных характеристик нуклидов в геологической среде, что обеспечивает определенный «запас надежности» расчетов.

Кинетика собственно физико-химических процессов взаимодействия компонентов отходов с геологической средой может не учитываться, т.е. может быть принято, что процессы протекают мгновенно. Вместе с тем перераспределение отходов в сложнопостроенном поровом пространстве горных пород протекает длительное время и сопровождается увеличением эффективной пористости n , за счет изменения открытой пористости n_o и коэффициента K_d .

Задерживающие свойства зависят как от типа пород, состава и структуры порового пространства, так и вида нуклидов, форм их нахождения в растворе, его макрокомпонентного состава.

Анализ результатов исследований и наблюдений за распространением загрязнений в геологической среде позволяет выделить четыре основных типа пород по условиям фильтрации и взаимодействия с ними жидких отходов или загрязненных вод (таблица 3.4).

Таблица 3.4.

Типы пород, характеризующиеся по их задерживающим свойствам

№№ п/п	Типы пород	Структура порового пространства и каналов фильтрации	Общая характеристика задерживающих свойств по отношению к нуклидам
1	2	3	4
1.	Рыхлые осадочные породы — пески, слабо-цементированные песчаники	Равномерно-распределенные поры малых размеров	Высокая
2.	Скальные магматические и метаморфические породы: граниты, порфиты, базальты, гнейсы и т. д.	Сеть сообщающихся трещин различного размера	Низкая
3.	Осадочные скальные и полускальные породы: известняки, мергели, крепкие песчаники	Сеть трещин и более или менее равномерно-распределенные поры в блоках, ограниченных трещин	Определяется структурой фильтрационного потока от низкой до высокой
4.	Слабопроницаемые осадочные породы: глины, аргиллиты, алевролиты, глинистые сланцы	Равномерно распределенные поры весьма малых размеров, общая пористость высокая	Очень высокая

В таблице 3.5. приведены типы поровых растворов (подземных вод, фильтрата отходов) по влиянию их макрокомпонентного состава на задерживающие свойства пород.

Таблица 3.5

Типы поровых растворов, влияющих на задерживающие свойства пород

№№ п/п	Типы растворов	Характеристика макрокомпонентного состава	Преобладающие процессы накопления и задержки нуклидов	Общая характеристика задерживающих свойств пород
1	2	3	4	5
1.	Подземные воды — пресные	Солесодержание до 1 г/л, натрия, кальция, магний, гидрокарбонат и хлор-ион	Ионный обмен, ад- и абсорбция, диффузия в минеральный скелет пород	Высокие

Продолжение таблицы 3.5

№№ п/п	Типы растворов	Характеристика макрокомпонент- ного состава	Преобладающие процессы накоп- ления и задержки нуклидов	Общая харак- теристика задер- живающих свойств пород
1	2	3	4	5
2.	Подземные воды — соленые	Солесодержание несколько десят- ков и сотен г/л, натрий, кальций, магний, хлор-, сульфат-ион	Ад- и абсорбция, диффузия в мине- ральный скелет пород	Низкие
3.	Нетехнологи- ческие отходы	Слабощелочные, содержание 1—30 г/л, соли жесткости, детер- генты, раствори- мые комплексы	Нарушение ста- бильности раст- воров, образова- ние осадков, включающих нуклиды, аб- и адсорбция	Высокие
4.	Технологи- ческие отходы — щелочные	Солесодержание 30—350 г/л, нит- раты, раствори- мые комплексы алюминия и кремния	Нарушение ста- бильности раст- воров, разруше- ние растворимых комплексов, об- разование осад- ков, включающих нуклиды, аб- и адсорбция	Высокие
5.	Технологи- ческие отходы — кислые	Солесодержание 250—350 г/л, рН ~ 1÷3, нитра- ты, растворимые комплексы тяже- лых металлов, комплексующие реагенты	» »	Низкие при рН менее 5—6, высокие после нейтра- лизации в ус- ловиях пласта- коллектора

В таблице 3.6 приведены нуклиды, сгруппированные по их способности задерживаться в почво-грунтах и песчано-глинистых породах, содержащих пресные воды.

Исследования задерживающих свойств пород включали изучение собственно пород и отходов, процессов их взаимодействия, определение коэффициентов межфазного распределения при наиболее вероятных макрокомпонентных составах отходов и для различных типов пород.

**Классификация нуклидов по их способности задерживаться в почво-грунтах
и песчано-глинистых породах (39)**

№№ п/п	Нуклид	Форма нуклида в подземных водах	K_p , см ³ /г
1	2	3	4
1.	Тритий	Входит в молекулы воды	0
2.	Технеций, йод, угле- род, фосфор, сера, хром	Анионная	0÷10
3.	Стронций, радий, кальций и др. щелоч- но-земельные	Катионная, слабораст- воримые формы суль- фатов и карбонатов	5÷50
4.	Церий, прометий, марганец, железо, кобальт, цинк, цирко- ний, нептуний и др. редкоземельные и переходные	Гидроокисные комп- лексные формы	10÷100
5.	Цезий	Стабильная катионная	100÷1000
6.	Торий, плутоний, америций	Полимерная форма	100÷1000

Примечание: с учетом состава макрокомпонентов поровых растворов задерживающая способность нуклидов будет меняться.

Наибольший объем исследований был выполнен для песчано-глинистых пород, содержащих пресные гидрокарбонатно-кальциевые воды, т.е. для условий полигонов захоронения Сибирского химического и Горно-химического комбинатов, вопросы безопасности эксплуатации которых приобретали главенствующее значение в связи со значительными объемами и высокой потенциальной опасностью захораниваемых отходов.

Для исследований использовались образцы пород, отобранные из коллекторских горизонтов при бурении скважин. Анализ многочисленных образцов различными методами (рентгено- и дифрактография, ИК-спектроскопия, химический анализ) показал, что наиболее характерными минералами, образующими исследуемые горные породы, являются кварц (70—80%), полевые шпаты типа ортоклаза, микроклина или

плагиоклаза (10—15%), минералы группы слюд и гидрослюд (мусковит, флогопит, вермикулит), а также глинистые минералы каолиновой группы (не менее 3—5%) и монтмориллонитовой группы (8—10%). Некоторые образцы содержали карбонатные минералы и органические вещества. Обменный комплекс содержит катионы: Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Na^{+} , H^{+} .

Сорбционная способность песчаных пород во многом определяется количеством глинистых минералов, которые, как известно, являются хорошими природными сорбентами [40]. Механизм сорбции зависит от характера кристаллических решеток минералов. Частицы каолинита имеют жесткую кристаллическую решетку, доступ ионов, находящихся в растворе, в межпакетные пространства исключен. Базальные поверхности электронейтральны, поэтому обменные реакции протекают только по сколам кристаллической решетки. Катионная емкость составляет 3—5 мг.-экв/100 г.

Гидрослюды также имеют жесткую кристаллическую решетку, но их базальные поверхности несут значительный отрицательный заряд, поэтому обмен катионов происходит не только по сколам, но и по всей площади базальных поверхностей. Емкость может составлять 10—40 мг.-экв/100 г. В обоих случаях обмен ионов осуществляется только на внешней поверхности частиц.

У минералов группы монтмориллонита поверхность глинистых частиц может представлять собой оборванный край кристаллической решетки и поэтому состоит из атомов с некомпенсированными электровалентными связями. Обмен ионов может идти не только на внешней поверхности, но и по сколам решетки, поэтому емкость достигает 150 мг.-экв/100 г.

Сорбционная емкость полевых шпатов определяется наличием обменных катионов натрия, кальция и протонов гидроксильных групп на поверхности. Сорбционная емкость кварца осуществляется за счет адсорбционных явлений и не превышает величины 0,5 мг.-экв/100 г. Сорбционная емкость многоминеральной смеси аддитивно складывается в соответствии с минеральным составом породы, определяется количественным соотношением песчаных, пылеватых и глинистых фракций и реализуется в составе нескольких процессов, протекающих параллельно.

Величина сорбционной емкости образцов песчано-глинистых пород, характеризующих пласты-коллекторы, определялась по насыщению стронцием-90 на фоне нитрата натрия. Результаты определений приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Сорбционные свойства песчано-глинистых пород

№№ п/п	Характеристика образца	Содержание глинистой фракции, %	Сорбционная емкость, мг.-экв/100 г
1	2	3	4
1.	Песчаник глинистый	18—24	3,0—3,5
2.	Песчаник	10—20	2,5—3,2
3.	Песчаник слабоглинистый	8—15	2,6—2,8
4.	Песок мелкозернистый	7—8,5	2,5—2,7
5.	Песок среднезернистый	6—7	1,8—2,0
6.	Песок крупнозернистый	5—6	1,0—1,6
7.	Песок отмытый	3—5	1,0—1,5

Как следует из таблицы, содержание глинистой фракции в значительной степени определяет сорбционную емкость пород.

При взаимодействии удаляемых отходов с породами пласта-коллектора происходит изменение сорбционной способности грунтов вследствие изменения состояния глинистой фракции, в частности ее диспергирования, приводящего к росту сорбционной емкости (при прочих равных условиях).

Как уже указывалось, задержка распространения нуклидов-компонентов отходов зависит не только от сорбционной емкости пород, но в весьма значительной степени от характера процессов в системе отходы—подземные воды, форм существования нуклидов, способности к осадкообразованию в отходах и в их смеси с подземными водами, свойств образующихся осадков. В связи с этим задерживающие свойства пород изучались с использованием реальных отходов или модельных растворов, в условиях, достаточно близких пластовым.

Распределение нуклидов изучалось в статических и динамических условиях. В первом случае проводились смешение со встряхиванием образцов нарушенных рыхлых пород с раствором, отстой и определение содержаний нуклидов в твердой и жидкой фазах. Во втором случае осуществлялось фильтрование раствора через нарушенные или ненарушенные образцы пород с определением содержаний нуклидов на выходе из колонки.

Предварительно проводилось насыщение пород водой, близкой по составу к подземной.

Результаты статических и динамических опытов существенно различались и соответствовали двум типам условий. В первом случае процессы протекали, как при длительном нахождении растворов в породах и малых скоростях их перемещения, когда происходит «пропитка» пород растворами. Во втором случае условия соответствовали процессам при интенсивном движении растворов в породах, например в районе нагнетательных скважин и в первые годы эксплуатации полигонов.

Проводилось также исследование десорбции нуклидов с пород растворами различного состава.

В таблице 3.8 приведены результаты определений коэффициентов межфазного распределения K_p при различном соле-содержании раствора (представленном нитратом натрия) и его кислотности для основных нуклидов-продуктов деления, входящих в состав отходов, и плутония-239, который содержится в отходах в неизвлекаемых микроконцентрациях, близких к допустимым (ДКБ).

Таблица 3.8

Коэффициенты межфазного распределения K_p (см³/г) нуклидов в песчано-глинистых породах в зависимости от соле-содержания и рН среды

№№ п/п	Нуклид	Поровый раствор			
		$pH=2\div3$ $\mu=1,0$	$pH=4\div5$ $\mu=1,0$	$pH\sim 8$ $\mu=1,0-0,2$	$pH\sim 8$ $\mu=1,0$
1	2	3	4	5	6
1.	Стронций-90	1,5–5,5	10–35	7–10	20–30
2.	Рутений-106	0,5–1,5	7,5–15	2–2,5	4,6–7,5
3.	Цезий-137	1,5–3,0	10–20	8–15	20–50
4.	Церий-144	1,0–1,5	40–100	5–10	9,5–19
5.	Плутоний-239	1,2–1,6	50–120	5–12	15–35

Примечание: μ — ионная сила, определяемая соле-содержанием K_p графы 4 получены для условий гидролиза макрокомпонентов.

Как следует из таблицы, задерживающие свойства песчано-глинистых пород характеризуются общей тенденцией возрастания с увеличением рН и уменьшением соле-содержания.

В таблице 3.9 приведены значения коэффициентов межфазного распределения и накопления нуклидов для нетехнологических малосоле-содержащих и слабощелочных отходов, весьма близких по составу пластовым водам, соответствующие им факторы задержки и десорбция нуклидов водой для песчано-глинистых пород, содержащих пресные воды.

Таблица 3.9

Задерживающие свойства песчано-глинистых пород по отношению к нетехнологическим слабощелочным отходам радиохимических предприятий

№№ п/п	Нуклид	$\frac{C_0}{C_{дкб}}$	K_p , см ³ /г	Фактор за- держки, R	Десорбция, %
1	2	3	4	5	6
1.	Стронций-90	$5 \cdot 10^3$	35—37	200—300	5,5—9,0
2.	Рутений-106	$9 \cdot 10^2$	7—14	45—85	1,4—4,0
3.	Цезий-137	$2,7 \cdot 10^2$	60—90	350—450	1,5—2,0
4.	Церий-144	$8 \cdot 10$		95—115	1,5—4,0
5.	Плутоний-239	10	110—140	500—625	3—6

Примечание: C_0 — содержание нуклида в отходах.

Жидкая фаза таких отходов не является стабильной, в пластовых условиях происходит выпадение осадков главным образом гидроокисных соединений алюминия, что способствует удалению из раствора всех коллоидных и псевдоколлоидных форм радионуклидов в твердой фазе. Гидроокись алюминия является хорошим сорбентом и выполняет эту роль в системе отходы — подземные воды для микроконцентраций нуклидов. Межфазное распределение характеризуется высокими значениями K_p , особенно для элементов, образующих с анионом осадка труднорастворимые соединения (церий, плутоний). Стронций и цезий поглощаются из раствора по механизму ионной адсорбции на поверхности осадка, так как в щелочных средах при $pH \sim 9$ гидратированная окись алюминия является катионообменником.

Менее других нуклидов накапливается в твердой фазе рутений, который находится в подобной среде в виде крупных гидролизированных ионов, имеющих отрицательный заряд, но и в этом случае скорость миграции нуклида будет более чем в 10 раз ниже, чем собственно воды и компонентов, не взаимодействующих с породами.

Отмечено достаточно прочное закрепление нуклидов на породах. При фильтрации через зону сорбции чистой воды в нее переходит не более 10% нуклидов, находящихся в твердой фазе, остальные нуклиды могут переходить в воду по схеме выщелачивания, т.е. весьма замедленно, в течение длительных периодов времени. Обусловленные этими процессами содержания нуклидов в подземных водах будут существенно ниже ДКБ.

Технологические отходы радиохимических предприятий представляют собой более сложные системы, характеризуются большим содержанием и активностью. Из направляемых на захоронение выделяются два основных типа отходов: щелочные и кислые.

Общий характер поведения щелочных отходов в поровом пространстве пласта-коллектора в целом близок к рассмотренному для нетехнологических. Однако значение K_p ниже из-за высокого солевого фона (см. таблицу 3.10). Количество поглощенных катионов (цезий, стронций) непосредственно породами будет определяться емкостью катионного обмена. Известно, что в щелочных средах в результате участия в обменных реакциях протонов гидроксильных групп $\geq \text{Si}-\text{OH}$ и $\geq \text{Al}-\text{OH}$, расположенных на боковых гранях кристаллов глинистых минералов, величина обменной емкости увеличивается [41]. Для гидролизированных форм нуклидов (рутений, плутоний) ионный обмен вряд ли будет осуществляться, но возможны другие механизмы — осаждение продуктов гидролиза, физическое удержание коллоидных частиц.

Таблица 3.10

Задерживающие свойства песчано-глинистых пород по отношению к технологическим щелочным отходам радиохимических предприятий

№№ п/п	Нуклид	$\frac{C_0}{C_{дхб}}$	K_p , см ³ /г	Фактор задержки, R	Десорбция, %
1	2	3	4	5	6
1.	Стронций-90	$2,5 \cdot 10^8$	5,5–7,0	26–33	16–31
2.	Рутений-106	$6,7 \cdot 10^6$	6,0–10,5	30–50	12–30
3.	Цезий-137	$6 \cdot 10^6$	4,5–6,5	30–30	11–13
4.	Плутоний-239	$1,4 \cdot 10^2$	40–95	200–460	10–15

По данным исследований М. К. Савушкиной (ИФХ РАН), при взаимодействии щелочных отходов с песчано-глинистыми коллекторскими породами происходит преобразование диоксидов кремния и алюминия, которые в последующем переходят в цеолитоподобные минералы. Их сорбционные свойства существенно выше, чем пород.

Направляемые на захоронение технологические отходы в кислой среде содержат в качестве макрокомпонентов помимо солей нитрата натрия растворимые комплексы, включаю-

щие ионы тяжелых металлов — продуктов коррозии: железо, хром, марганец, никель. При удалении таких отходов без подготовки вследствие взаимодействия отходов с породами происходит резкое снижение кислотности, выпадение в осадок слаборастворимых гидроокисей, захватывающих и соосаждающих нуклиды. Высокое накопление в породах при этом может привести к перегреву пласта, возникновению предпосылок аварийных ситуаций. Для стабилизации растворов и ограничения накопления нуклидов, с одной стороны, снижения кислотности с целью уменьшения агрессивности отходов, с другой, применяется комплексование легкогидролизующихся катионов путем введения при подготовке отходов различных комплексообразующих реагентов, например уксусной кислоты. При этом удается снизить кислотность до pH 2÷3 и стабилизировать гидролизующиеся катионы тяжелых металлов путем образования ацетатных комплексов. В результате снижается накопление нуклидов в породах и их задерживающие свойства. Характеристика задерживающих свойств песчано-глинистых пород для таких систем приведена в таблице 3.11.

Таблица 3.11

Задерживающие свойства песчано-глинистых пород по отношению к технологическим кислым отходам радиохимических предприятий

№№ п/п	Нуклид	$\frac{C_0}{C_{дтб}}$	K_p , см ³ /г	Фактор за- держки, R	Десорбция, %
1	2	3	4	5	6
1.	Стронций-90	1·10 ⁹	1,2—1,3	6—9	21—22
2.	Рутений-106	7·10 ⁷	1,3—1,6	6—7	0,5—1,2
3.	Цезий-137	2·10 ⁷	2,7—2,8	13	0,7—1,3
4.	Церий-144	6,5·10 ⁸	1,0—1,6	4—8	12—19
5.	Нептуний-237	10 ²	1,8—2,3	9—11	8—40
6.	Плутоний-239	10 ³	1,4—1,6	13—30	0,5—3,0
7.	Америций-241	10 ⁴	1,1—1,2	5—6	18—20

В результате исследований было установлено, что ацетатные комплексы обладают ограниченной устойчивостью и разрушаются в пласте под воздействием температуры, радиационного облучения, в результате уменьшения кислотности. Вследствие этих явлений развиваются процессы гидролиза, образуются осадки гидроксидов, например железа и алюминия, что обуславливает рост K_p до значений, близких к пока-

занным в таблице 3.8 графа 4. Значения K_p для трансурановых нуклидов возрастают почти в 10 и более раз.

Это явление было использовано для разработки технологии подготовки и порционного захоронения технологических отходов в кислой среде с комплексуемым реагентом, что может обеспечить перевод до 95—90% нуклидов в твердую форму после их удаления или их частичное отверждение непосредственно в пласте, но вне прифилтровой зоны.

Высокие задерживающие свойства песчаных пород по отношению к нуклидам, компонентам отходов, установленные на основании лабораторных исследований, были подтверждены материалами наблюдений за распространением отходов в пластах-коллекторах полигонов захоронения.

Так, при захоронении нетехнологических отходов Сибирского химического и Горно-химического комбинатов в наблюдательных скважинах, расположенных на расстояниях 250—400 м от нагнетательных, после удаления 1—2 млн. м³ отходов в пласты-коллекторы эффективной мощностью 20—30 м и с открытой пористостью 0,1—0,2 были обнаружены только нерадиоактивные компоненты отходов — анионы солей. Вместе с тем в стволах нагнетательных скважин в интервалах пласта-коллектора фиксировались значения гамма-поля на 3 порядка выше, чем те, которые должны были бы быть при отсутствии накопления нуклидов в породах. Расчеты показали, что отмеченному накоплению должны соответствовать K_p для гамма-излучающих компонентов отходов порядка $1 \div 3$ см³/г.

По данным измерений температур в нагнетательной скважине, в которую удалялись кислые технологические отходы, было определено среднее накопление нуклидов в породах и соответствующее ему значение K_p , составившее $0,5 \div 1$ см³/г.

Однако самое убедительное подтверждение задерживающих свойств песчано-глинистых пород было получено при опытном нагнетании среднеактивных отходов — декантата ликвидируемого бассейна Б-2 Сибирского химического комбината. Нагнетание с расходом 1900—2000 м³/сут осуществлялось в пласт-коллектор II горизонта, залегающий в интервале глубин 326—349 м. Отбор проб подземных вод проводился из наблюдательной скважины, расположенной на расстоянии 55 м от нагнетательной. После удаления 50 тыс. м³ отходов в пробах были отмечены содержания не взаимодействующих с породами нитрат- и хлор-ионов на уровне отходов, в то же время содержания стронция и рутения были на 3 порядка ниже, чем в отходах, а цезия на 4 порядка ниже. На рис. 7 приведены схема и результаты опыта в виде «выходных» кривых для определяемых компонентов.

Схема расположения скважин

Масштаб 1:2500

С-156 • • С-157

Д-2 • Д-1

Геологический разрез

Масштаб горизонт. 1:300
вертикальн. 1:1000

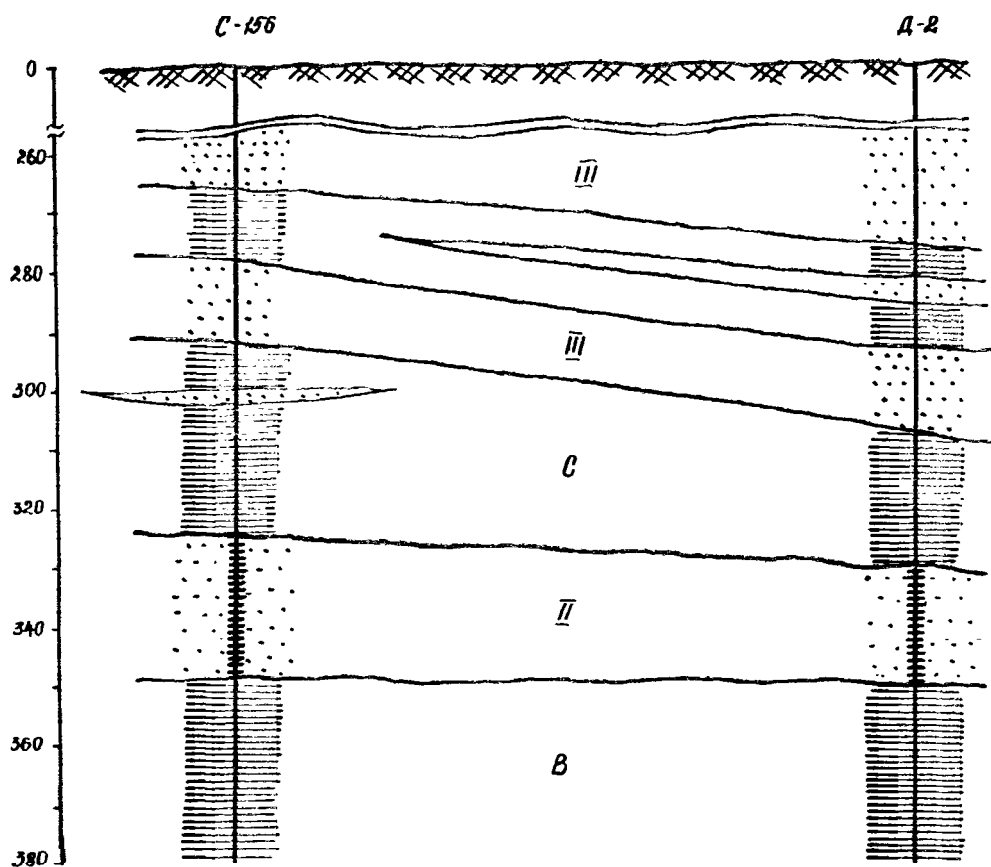
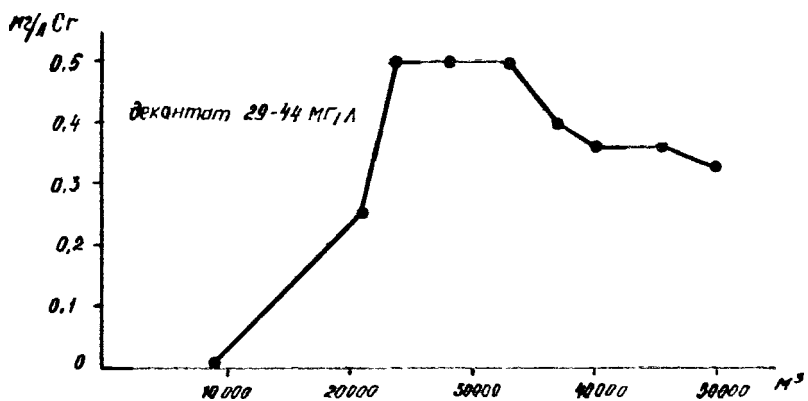
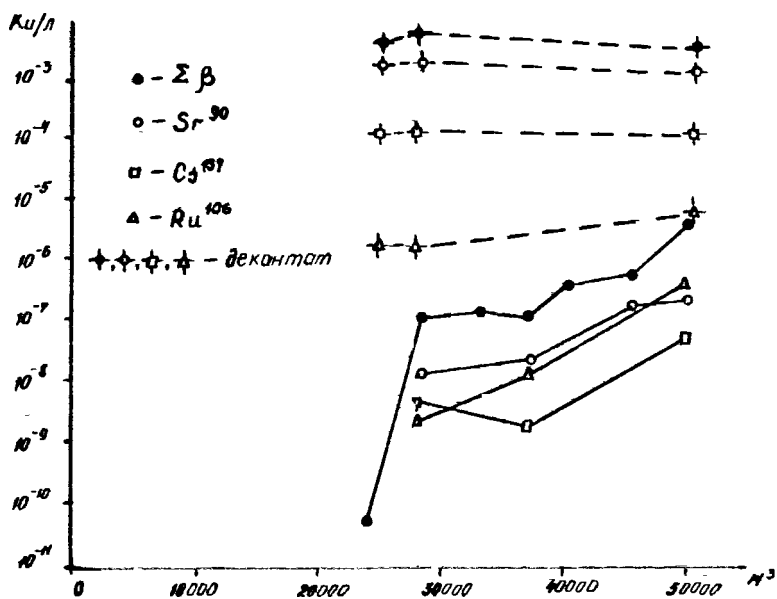
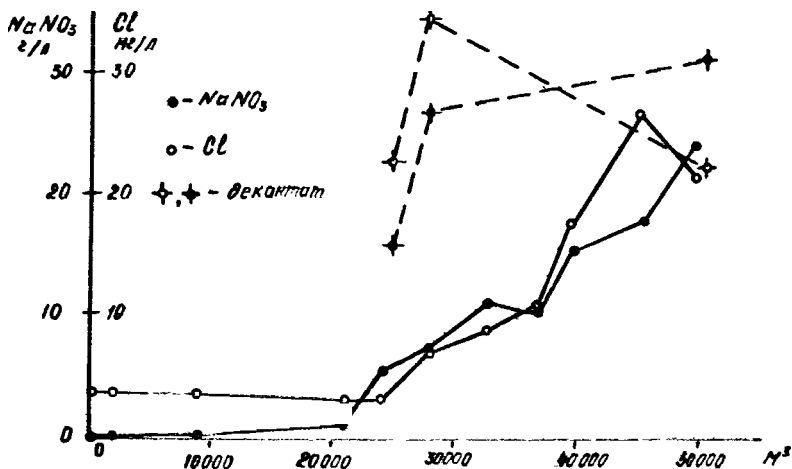
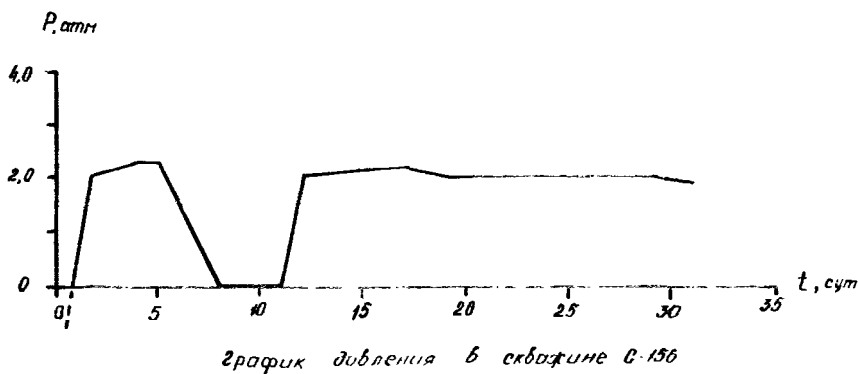
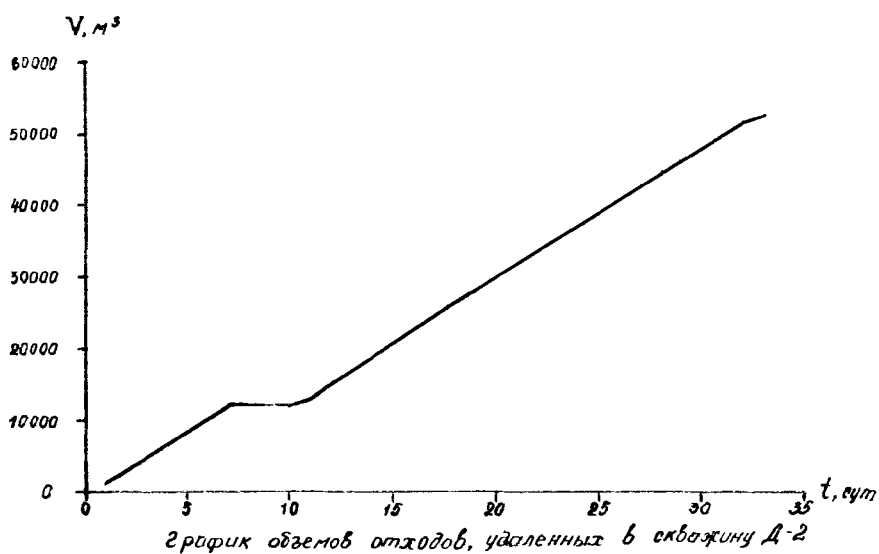
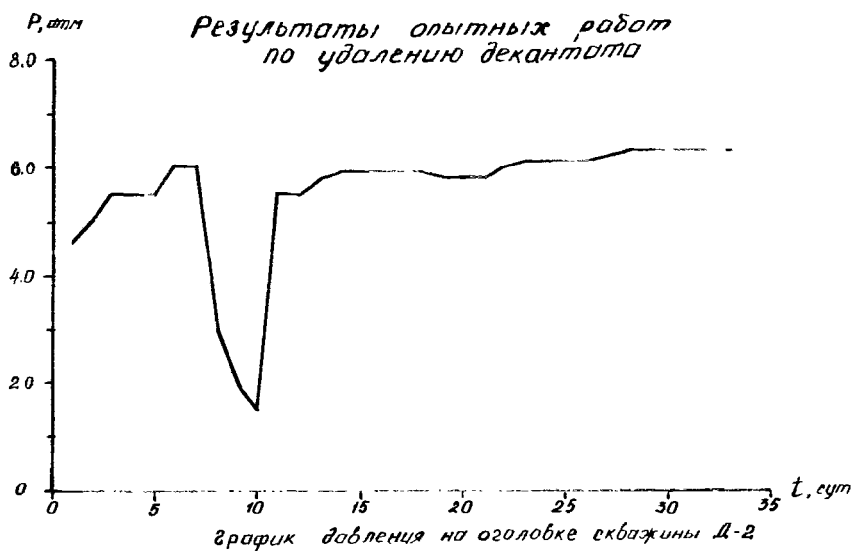


Рис. 7. Графики зависимости содержаний компонентов в скв. С-156 от объемов нагнетания.





Высокие задерживающие свойства пористых пород по отношению к нуклидам были отмечены и другими исследователями. По данным Э. В. Собоновича и Ю. А. Ольховика, значения K_p для стронция-90 и для песчаных пород дамбы пруда-накопителя Чернобыльской АЭС характеризуются значениями 5—6 см³/г. Для цезия-137 K_p характеризуется значениями 150—300 см³/г [42]. В соответствии с исследованиями задерживающих свойств различных пород, выполненных в США по заказу агентства по охране окружающей среды [43], значения K_p для песчаников, содержащих пресную воду, оценивались значениями для стронция 2,5, цезия 200, плутония 2000 и америция 20000 см³/г. Для глин значения K_p для плутония и америция выше в несколько раз. Обобщение большого числа определений задерживающих свойств приведено также в уже упоминавшейся работе [39].

3.4. МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ

Возможность прогнозирования последствий глубинного захоронения жидких РАО является одним из условий применения этого способа обращения с отходами. Прогнозные расчеты изменений напорного режима коллекторских горизонтов, распространения и миграции компонентов отходов выполняются для установления области влияния захоронения, границ санитарно-защитных зон и горного отвода недр, выбора оптимальных схем нагнетания и контроля эксплуатации полигонов. Оценка безопасности включает прогнозирование и других процессов, связанных с захоронением.

При прогнозировании последствий захоронения использовались модели геологической среды и процессов, обосновывавшиеся с привлечением результатов геолого-разведочных и опытно-фильтрационных работ, лабораторных исследований и опыта решения близких практических задач. Под моделью понималось представление о тех или иных объектах или явлениях, которое на начальной стадии носит качественный характер и по мере получения результатов исследований и проработок наполняется количественными соотношениями, выражаемыми обычно системой уравнений, наборами параметров и характеристик, в том числе в виде карт, схем, разрезов и таблиц.

В начальный период решения проблемы глубинного захоронения жидких РАО использовались теоретические основы нефтяной гидродинамики, разработанные В. Н. Щелкачевым,

П. Я. Полубариновой-Кочиной и другими [63, 64, 65], что позволило выполнять необходимые расчеты полей напоров и заполнения пластов-коллекторов нагнетаемыми растворами с рядом допущений.

Прогнозные расчеты выполнялись для упрощенных условий и с большим запасом надежности, что, однако, не помешало получить необходимые исходные данные для обоснования и проектирования систем захоронения, показать безопасность такого способа обращения с отходами.

В последующем при проектировании, строительстве и эксплуатации полигонов захоронения, оптимизации режимов нагнетания отходов и подтверждении безопасности захоронения были проведены дополнительные работы по совершенствованию теоретических основ глубинного захоронения жидких РАО, моделей геологических условий и процессов и, что необходимо подчеркнуть, методов исследования математических моделей, решения прогностических задач. Широкое развитие в 70–80-х годах методов численного моделирования с использованием ЭВМ позволило решать многие задачи, максимально приближенные к условиям захоронения жидких РАО на конкретных объектах.

Большую роль в развитии теоретических основ и методов прогностических расчетов сыграли работы сотрудников Института ВНИИВодгео Н. Н. Веригина, Б. С. Шержукова, В. С. Саркисяна, Ф. М. Бочевера в области гидродинамики и массопереноса с учетом физико-химических взаимодействий и гидродинамической дисперсии; работы сотрудника Института ВСЕГИНГЕО В. М. Гольдберга в направлении изучения закономерностей фильтрации растворов в глинах водоупорных образований и структур потока нагнетаемых растворов. Были также использованы результаты проработок В. М. Шестакова (МГУ) и В. А. Мироненко (ЛГИ), выполненные в области охраны подземных вод и изучения последствий их загрязнения.

Большой объем работ был выполнен в Институте ВНИПИ-промтехнологии по исследованию особенностей работы нагнетательных скважин (Костин П. П.), тепловых полей при захоронении жидких РАО (Ф. П. Юдин, Л. И. Владимиров, Г. А. Окуньков). Здесь были детально разработаны методы численных расчетов для исследования теоретических моделей, максимально приближенных к реальным условиям (Г. А. Окуньков, М. А. Синельников, Н. М. Бурмистрова). Результаты прогнозных расчетов прошли практическую проверку при эксплуатации полигонов захоронения.

В настоящем разделе приводится общая характеристика применяющихся моделей и методов их исследования по состоянию на конец 1992 г.

Процессы, сопровождающие глубинное захоронение жидких РАО, могут быть разделены на четыре основные группы по общности соответствующим им моделей:

- изменение пьезометрической поверхности (напорного режима) подземных вод коллекторского горизонта, в который осуществляется нагнетание отходов;

- заполнение порового пространства и распределение отходов в пласте-коллекторе и водоупорах, смешение отходов с подземными водами, физико-химические явления в системе отходы — породы — пластовые воды;

- изменение геостатического состояния геологической среды;

- изменение температуры геологической среды.

Эти процессы протекают в пространстве геологической среды, характеристики которой в значительной степени определяют их параметры. Поэтому одним из первых этапов прогнозирования является обоснование моделей геологической среды и, в частности, моделей пространственного распределения гидрогеологических параметров. Гидрогеологические параметры известны в отдельных точках или участках — местах бурения скважин и проведения опытно-фильтрационных исследований. При прогнозировании необходимо использовать и промежуточные значения, которые для ряда параметров могут быть рассчитаны методом локальной аппроксимации.

Изменение напорного режима пласта-коллектора, в который осуществляется нагнетание отходов, является первым характерным признаком поступления отходов в поровое пространство коллектора и вытеснения подземных вод. Изменение напоров выражается в повышении пьезометрических уровней подземных вод в наблюдательных скважинах (уменьшение глубины их залегания) или давления на устье скважины, если уровень подземных вод выше поверхности земли, а устье скважины загерметизировано.

При этом в коллекторском горизонте формируется «купол репрессии», центральная часть которого находится в районе нагнетательной скважины. Значения напора уменьшаются по радиусу от скважины приблизительно пропорционально логарифму расстояния, параметры купола репрессии определяются временем и объемом нагнетания, геологическими условиями и характеристиками пласта-коллектора, конструкциями, количеством и схемой расположения скважин.

При разгрузке пласта-коллектора, т. е. откачке чистой воды из скважин, удаленных от нагнетательных, одновременно с куполом репрессии образуется воронка депрессии и развиваемые напоры будут ниже, чем без разгрузки. Скорость распростра-

нения гидродинамического возмущения в пласте-коллекторе значительно больше распространения собственно отходов, благодаря чему поле напоров позволяет оценить структуру поля фильтрации отходов задолго до их появления.

На рисунке 8 в качестве иллюстрации приведены схемы купола репрессии и распространения отходов в пласте-коллекторе для произвольно выбранных условий.

Поля напоров, создаваемые нагнетанием отходов, и естественных напоров определяют направления и скорости течения жидкости в пористой среде пласта-коллектора, которые зависят также от фильтрационных характеристик пласта-коллектора, граничных условий, размещения скважин и т. д.

Поля напоров описываются известным уравнением фильтрации, аналитические решения которого для простейших случаев позволяют рассчитать поля напоров [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53]. При обосновании и проектировании полигонов захоронения широко применялись методы аналогового моделирования (метод ЭГДА), с помощью которого решались двумерные уравнения фильтрации с учетом реальной геометрии пласта-коллектора и схем нагнетания [54].

В последние годы уравнения фильтрации решаются методом конечных разностей. Получающаяся в результате конечно-разностной аппроксимации система линейных уравнений решается методом покомпонентной верхней релаксации.

Такая модель фильтрации позволяет моделировать два режима фильтрации — с учетом действия источников и без источников. При действии источников, таких, как нагнетательные и разгрузочные скважины, водозаборы, их дебиты аппроксимируются по ступенчатому закону и весь режим фильтрации рассматривается как последовательная смена стационарных состояний. Моделирование естественного режима подземных вод проводится без источников.

В некоторых случаях, при создании конкретной модели водоносного горизонта, могут отсутствовать точные сведения напоров в ряде точек. В этом случае использовать напрямую приведенную систему уравнений по ряду причин невозможно. Был предложен следующий вариант построения модели фильтрации. Водоносный горизонт оконтуривается в плане границей по крайним точкам, в которых известны экспериментальные значения напоров. Промежуточные значения напоров на этой границе рассчитываются методом локальной аппроксимации, во внутренней области решается уравнение фильтрации.

В результате получают распределение полей напоров для различных периодов времени, схем нагнетания и разгрузки,

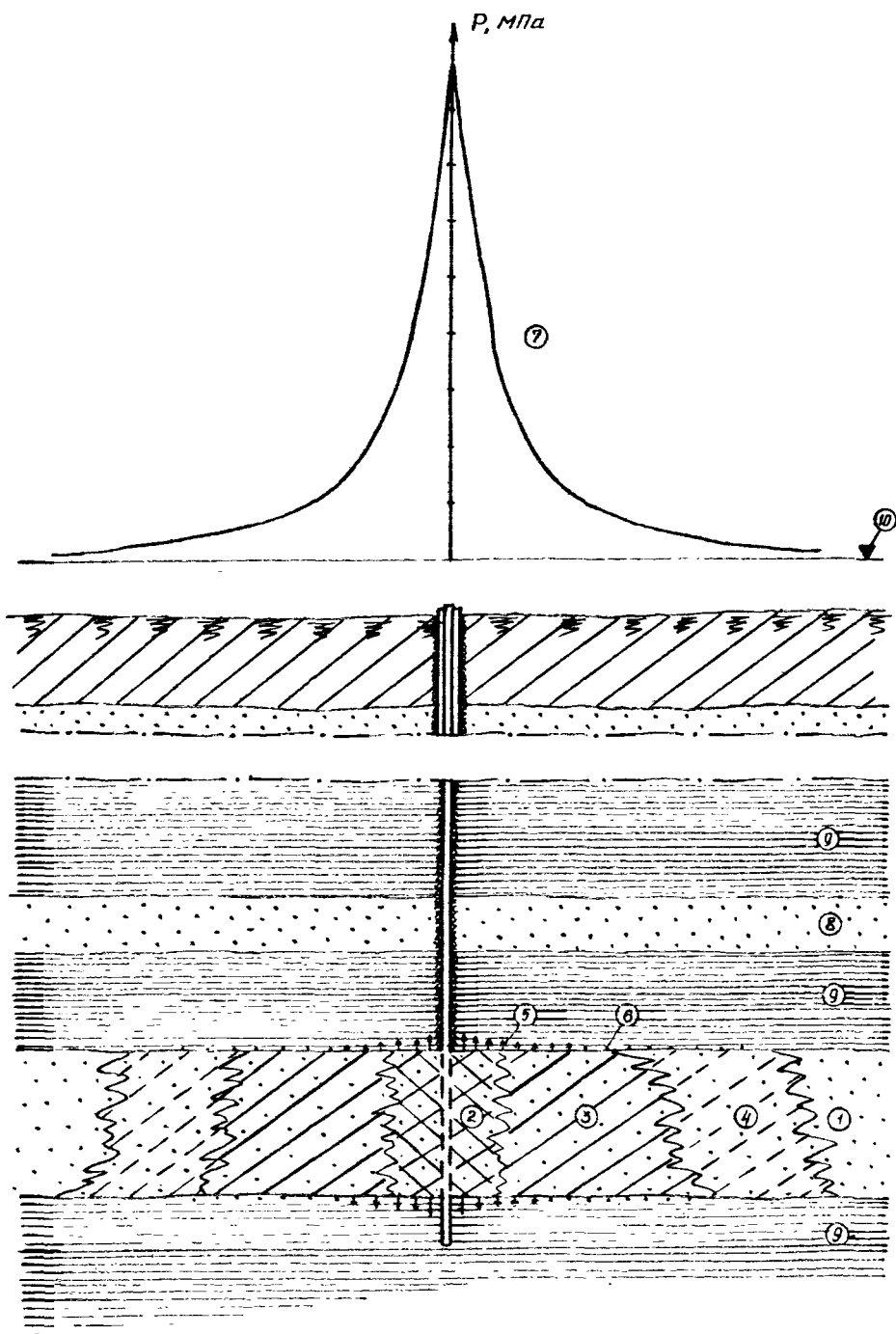


Рис. 8. Схема купола репрессии и распространения отходов в пласте-коллекторе
 1 — пласт-коллектор; 2 — зона концентрирования нуклидов; 3 — фильтрат отходов;
 4 — зона дисперсии; 5, 6 — фильтрационное и диффузное поступление растворов
 в водоупоры; 7 — график пластового давления; 8 — буферный горизонт; 9 — слабо-
 проницаемые горизонты; 10 — естественное пластовое давление.

которые могут быть использованы для построения линий токов пластовой жидкости и являются основой для расчетов распространения отходов.

Рассчитываемые поля напоров на основании данных геолого-разведочных работ, как правило, несколько отличаются от тех, которые будут получены при реальном нагнетании отходов. Это обусловлено неизбежной неопределенностью исходных данных, ошибками интерполяции и осреднения. Как показывает практический опыт, существенное влияние оказывает несовершенство нагнетательной скважины по характеру вскрытия пласта, приводящее иногда к существенной потере напора в фильтре скважины и в прифильтровой зоне. В связи с этим после сооружения эксплуатационных скважин выполняются длительные нагнетания воды, сопровождающиеся наблюдениями за пьезометрической поверхностью подземных вод в контрольных скважинах, на основании которых путем решения обратных задач осуществляется корректировка моделей пласта-коллектора, проводятся уточненные прогнозные расчеты напоров и сеток течений.

При необходимости могут использоваться модификации известного уравнения фильтрации, учитывающие взаимодействия между горизонтами, их макронеоднородность и другие факторы.

После окончания нагнетания отходов происходит уменьшение напоров в центральной области купола репрессии в результате перераспределения напора на значительные площади. Снижение избыточных напоров в нагнетательных скважинах ниже поверхности земли происходит в зависимости от фильтрационных характеристик пласта, объемов и длительности нагнетания от нескольких суток до месяцев. При нагнетании малосолесодержащих отходов в пласты с минерализованными водами подпор на устье скважин остается и после окончания нагнетания отходов.

Распространение и миграция отходов и их компонентов в пласте-коллекторе определяются создаваемым и естественным полем напоров, объемами и режимами нагнетания, емкостными свойствами пласта, его неоднородностью, процессами физико-химических взаимодействий в системе отходы — породы — пластовые воды. Под влиянием развиваемого градиента напора отходы постушают из ствола скважины через ее фильтр в пласт-коллектор, заполняют поровое пространство, вытесняя подземные воды и частично смешиваясь с ними.

В результате в пласте-коллекторе образуется «залежь» отходов, в краевых частях которой находится зона дисперсии (смешения) отходов и пластовых вод. Вследствие протекания

физико-химических процессов в системе отходы — породы — подземные воды состав отходов в поровом пространстве изменяется из-за перехода компонентов отходов в твердую фазу в виде сорбата на породах и образующихся осадках, собственно осадков. Изменяются кислотно-основные характеристики фильтрата отходов, значение рН приближается к естественному, что также способствует осадкообразованию (см. р. 3.3).

Наибольшее накопление нуклидов в породах пласта-коллектора происходит обычно вблизи нагнетательных скважин. В краевых частях залежи отходов находятся, в основном, компоненты, не взаимодействующие с породами, и собственно воды отходов.

Происходит диффузия компонентов отходов в породный скелет пласта-коллектора, подстилающих и перекрывающих водоупоров.

После окончания нагнетания отходов смещение компонентов отходов происходит под воздействием естественного движения подземных вод (см. рис. 8).

Для описания процессов распространения и миграции компонентов РАО в пластах-коллекторах используется плановая двумерная модель массопереноса, учитывающая конвективный перенос, гидравлическую дисперсию, радиоактивный распад. Взаимодействие нуклидов с геологической средой учитывается введением эффективной (кажущейся) пористости, зависящей от коэффициента межфазного распределения (см. р. 3.3) [47, 51, 55]. Аналогичные приемы используются для учета неравновесности сорбционных процессов (частично необратимая сорбция).

Уравнения массопереноса решаются методом конечных разностей, но при этом возникает проблема следующего характера. Основную погрешность в численное решение этим методом вносит конечно-разностная аппроксимация конвективных членов уравнения массопереноса (так называемая «численная дисперсия»). При небольших числах Пекле возможно использование традиционных аппроксимаций конвективных членов. Но при больших числах Пекле и в случаях высокой токсичности загрязнений, когда необходимо отслеживать уровни загрязнений порядка 10^{-5} — 10^{-10} в относительных концентрациях, влияние численной дисперсии особенно существенно. Основным способом увеличения точности решения в этом случае является уменьшение шага разбивки пространственной сетки, что приводит к резкому увеличению затрат ресурсов ЭВМ. Для уменьшения численной дисперсии без значительного увеличения затрат ресурсов ЭВМ предлагается модификация конечно-разностного метода, в котором конвекция и дисперсия рассматриваются раздельно.

Уравнение дисперсии (без конвективных членов) решается на двумерной разностной сетке (основной), а двумерное уравнение конвективного переноса сводится к одномерному уравнению в пределах каждой ячейки основной сетки. За счет такого сокращения размерности можно значительно уменьшить пространственный шаг дискретизации конвективного члена для увеличения точности решения задач без резкого возрастания затрат памяти ЭВМ и времени.

Параметры, входящие в уравнения, определяются по данным геолого-разведочных и опытных работ, лабораторных исследований.

Приведенная методика расчетов распространения отходов и миграции их компонентов была использована при прогнозировании процессов и последствий захоронения жидких РАО Сибирского химического и Горно-химического комбинатов. Некоторые результаты приведены в гл. 5, посвященной анализу и комплексной оценке безопасности эксплуатации действующих полигонов.

Решение системы уравнений конечно-разностным методом весьма сложно и требует значительных затрат машинного времени. Для ориентировочных расчетов могут быть использованы упрощенные выражения, приведенные в вышеуказанной литературе.

Различие плотностей нагнетаемых отходов и подземных вод приводит к образованию наклонной границы фронта поршневого вытеснения (в вертикальной плоскости), что в целом увеличивает контур распространения отходов. Известны расчетные формулы для оценки ширины проекции наклонной границы на горизонтальную плоскость, которые, однако, не учитывают дисперсионные явления.

Ширина проекции наклонной границы увеличивается с ростом разности удельных весов контактирующих отходов и пластовых вод, дисперсионные явления уменьшают эту разность в зоне смешения отходов и вод в связи с уменьшением плотностного градиента при смешении вод и отходов. В работе [55] также указывается на существование обратной пропорциональной зависимости между шириной плотностной наклонной границы и шириной зоны дисперсии.

В институте ВНИПИпромтехнологии Г. А. Окуньковым была составлена программа для прогнозных расчетов миграции отходов в условиях синклинали залегания слоев с учетом различия плотностей (плотностной конвекции), гидравлической дисперсии, вязкости. Результаты расчетов приведены в р. 5.2. Как следует из сопоставления результатов с учетом и без учета плотностных эффектов, этот фактор оказывает

влияние при длительных периодах времени для центральных участков контура отходов, характеризующихся наибольшим различием плотностей относительно подземных вод и находящихся в синклинальной зоне с минимальными отметками пласта-коллектора.

Важным фактором, обуславливающим уменьшение влияния различия плотностей отходов и подземных вод, является слоистое строение пластов-коллекторов, которые могут быть представлены в разрезе чередованием слоев различной проницаемости, разделенных слоями низкой проницаемости. Малая мощность проницаемых слоев, обычно характеризующаяся значениями 5—15 м, определяет и уменьшение ширины зоны проекции наклонной границы по сравнению с суммарной мощностью слоев.

Слоистость коллекторских горизонтов или их вертикальная фильтрационная неоднородность может существенно влиять на закономерности распространения отходов, особенно если в их составе имеются слои, обладающие существенно большими фильтрационными свойствами, чем средние по разрезу. Если подобное явление обнаружено по результатам геолого-разведочных работ, приходится рассчитывать продвижение отходов по каждому слою, решая профильные двумерные задачи. В то же время, как показывает опыт наблюдений на 3 полигонах захоронения РАО, вертикальная неоднородность проявляется на сравнительно небольших расстояниях от нагнетательных скважин, оцениваемых значениями десятков и первых сотен метров. На удалении от нагнетательного контура для больших массивов пород в результате фациальной изменчивости и литологического замещения слоев повышенной проницаемости, выклинивания разделяющих их слабопроницаемых слоев и возникновения внутрипластовых перетоков, а также изменения профиля приемистости скважин, как следствие кольматации, происходит выравнивание фронта отходов по отдельным слоям.

Исключение составляют слои аномально высокой проницаемости, существенно отличающиеся по литологии и структуре порового пространства от основной коллекторской толщи, как, например, маломощный слой кавернозных известковистых песчаников, залегающий в прикровельной части терригенной пачки III проницаемой зоны опытно-промышленного полигона НИИАР (см. р. 5.3). Такие слои могут быть обнаружены при специальных исследованиях в составе геолого-разведочных работ.

Плановая фильтрационная неоднородность учитывается при прогнозных расчетах с использованием распределения

водопроницаемости в рассматриваемой области пласта-коллектора, которое определяется при геолого-разведочных работах.

При прогнозных расчетах распространения отходов на стадиях обоснования и проектирования полигонов в начале 60-х годов процессы задержки нуклидов породами обычно не учитывались, определялось положение «жидкой» или водной фазы отходов, что позволяло получать результаты с большим «запасом надежности». В последующем расчеты выполнялись с использованием значений эффективной пористости, определенной по открытой пористости и коэффициенту распределения K_p (см. р. 3.3). Однако считалось, что сорбционные процессы носят обратимый характер, т.е. сколько сорбировалось, столько и десорбировалось нуклидов потоком подземных вод. Фактически десорбируется только меньшая часть нуклидов.

Частично необратимая сорбция приводит к уменьшению содержаний нуклидов в подземных водах до значений меньших ДКБ и переходу их в породы на небольших расстояниях от нагнетательных скважин.

Отмечается также увеличение с течением времени доли пор, заполняемых отходами. В результате диффузионных процессов компоненты отходов поступают также в тупиковые и субкапиллярные поры, в связи с чем пористость пород пласта-коллектора, обуславливающая его емкость, возрастает и приближается к общей. При этом увеличиваются и коэффициенты межфазного распределения нуклидов.

Все эти факторы приводят к уменьшению распространения отходов в пласте-коллекторе.

Увеличение напоров в пласте-коллекторе создаст условия для поступления отходов в слабопроницаемые глинистые породы водоупоров, подстилающих и перекрывающих пласт-коллектор, фильтрационные свойства которых хотя и очень малы, но отличны от «0».

В соответствии с исследованиями В. М. Гольдберга фильтрация растворов в глинах возникает после превышения градиентом напора порогового значения — начального градиента фильтрации [24]. Анализ приведенных значений показывает, что такие условия возникают в непосредственной близости нагнетательной скважины в центральной области купола репрессии.

Низкие значения коэффициентов фильтрации глинистых водоупоров обуславливают и низкие скорости фильтрации через глинистые породы, имеющие также высокие задерживающие свойства, в связи с чем компоненты отходов не достигают вышележащего буферного горизонта. Поступление

отходов в глины будет происходить только в период нагнетания отходов и существования избыточных напоров.

При нагнетании отходов с малым содержанием солей в пласты-коллекторы с высокоминерализованными водами избыточный напор, т.е. превышающий естественный напор в пласте-коллекторе, будет наблюдаться и после прекращения нагнетания отходов, однако существенное снижение проницаемости глин при замене солесодержащей поровой жидкости на пресную существенно снизит фильтрационные процессы в глинах [24].

Расчеты поступления отходов (жидкой или водной фазы) в перекрывающие и подстилающие глины в области превышения начального градиента фильтрации могут выполняться конечно-разностными методами на основе решения уравнений, однако чаще используются приближенные решения.

Ощутимые перетоки между пластом-коллектором и вышележащими горизонтами возникают при существовании в водупорных пластах фильтрационных окон литологического или тектонического происхождения. Считается, что такие «окна» в области влияния захоронения отсутствуют, что устанавливается при геолого-разведочных работах, в противном случае решение об осуществлении захоронения не принимается.

Тем не менее при анализе гипотетических осложнений и аварийных ситуаций возникает необходимость проведения таких оценок.

Переток жидкости через «окно» начнется до появления в его районе отходов (если только «окно» не совпадает с нагнетательным контуром) и может быть установлен по данным контрольных наблюдений на начальном этапе захоронения, что позволит принять меры по изменению его режимов вплоть до приостановления. Имеются способы выявления и определения местоположения зон перетока, определения его расхода. В отдельных случаях роль «окон» могут играть скважины, затрубное и межтрубное пространство которых не изолировано.

Возникающая в результате градиента концентраций компонентов отходов их диффузия в перекрывающие и подстилающие пласт-коллектор слои в общем виде описывается уравнением Фика. Как показывают расчеты, диффузия играет небольшую роль в распространении нуклидов из пласта-коллектора. Так, диффузия стронция-90, находящегося в содержаниях 1 Ки/л, в перекрывающем водопоре не превысит 10 м за время, необходимое для распада нуклида до безопасных содержаний.

Формирование купола репрессии в пласте-коллекторе вызывает перераспределение напряжений в массиве гор-

ных пород, что создает предпосылки для их деформации. Вместе с тем при устанавливаемых режимах нагнетания отходов эти изменения весьма малы и не приводят к значимому смещению толщ пород. Так, при нагнетании отходов при давлении 2,0 МПа в пласт-коллектор, залегающий на глубинах 400 м с глубиной статического уровня подземных вод 20 м, при близких плотностях отходов и подземных вод увеличение естественного пластового давления пласта-коллектора в непосредственной близости от нагнетательной скважины не превышает 15—20%. Относительное приращение пластового давления уменьшается по радиусу от скважины пропорционально логарифму расстояния. Для глубокозалегающих коллекторов, содержащих высокоминерализованные воды, в которые нагнетаются отходы с малым солесодержанием, изменение естественного пластового давления будет меньше на 0,5—1 порядок.

Известны уравнения, описывающие влияние напряженно-деформированного состояния на консолидацию пород, залегающих выше проницаемых горизонтов, используемых для отбора воды или нагнетания растворов, развития деформаций и перемещений [56]. Имеются методы их решения, позволяющие с той или иной степенью приближения получить оценки возможных геодинамических явлений.

Как показывают расчеты, изменения положения поверхности, обусловленные изменением пластового давления, характеризуются долями миллиметра и затухают в интервалах выше первых сотен метров над пластом-коллектором, в связи с чем могут быть зафиксированы на поверхности при нагнетании отходов большей частью только в неглубокозалегающие горизонты.

Реакция положения поверхности на развитие купола репрессии существенно запаздывает и также может быть оценена по известным формулам. Время запаздывания, в зависимости от глубины коллектора и развиваемого давления, составляет от нескольких лет до сотен лет.

В осадочных комплексах, пригодных для захоронения жидких РАО, как правило имеются горизонты пород, обладающие в той или иной степени не учитываемыми при геодинамических расчетах пластичными свойствами, благодаря которым проявления изменения напряженного состояния геологической среды будут минимальны и практически не ощутимы.

При захоронении отходов регламентируются давления нагнетания, которые не должны быть выше давления гидроразрыва, изменяющего структуру пласта-коллектора и положение его пород.

Известны случаи опускания поверхности при интенсивном водопонижении, обусловленные несоизмеримо большими объемами извлекаемых вод, чем нагнетаемых отходов, сработкой уровней и осушением верхних зон неглубокозалегающих водоносных горизонтов и связанным с этим изменением инженерно-геологических свойств пород. Геодинамические явления и вызванная сейсмичность возникают при нагнетании вод под высоким давлением непосредственно в зоны тектонических нарушений, контактирующие блоки которых сложены скальными породами, находящимися в напряженном состоянии, т. е. в сейсмически активных областях и в зонах активных разломов, где захоронение жидких РАО обычно не проводится.

Радиоактивный распад нуклидов-компонентов жидких РАО сопровождается выделением энергии и увеличением температуры геологической среды, вмещающей отходы. Определенные опасения вызывал разогрев пласта-коллектора до значений, превышающих температуру парообразования, что существенно осложнило бы проведение захоронения и создало предпосылки аварийных ситуаций.

Как показали предварительные расчеты при обосновании глубинного захоронения жидких РАО, высокий разогрев может возникнуть при захоронении высокоактивных отходов с активностью продуктов деления более нескольких Ки в литре. В то же время температура парообразования в пластовых условиях из-за гидростатического давления выше и составляет, например, для глубин ~ 300 м около 220° , С.

Для среднеактивных отходов температура не превысит нескольких десятков градусов и для низкоактивных отходов практически может быть не замечена.

В таблице 3.12 приведены энерговыделения основных компонентов РАО для характерного состава отходов и различных периодов времени после образования и захоронения отходов. В таблице 3.13 дана сравнительная характеристика энерговыделения жидких РАО, направляемых на захоронение и отвержденных высокоактивных, которые предполагается направлять на захоронение в слабопроницаемые геологические формации. Как показывают эти данные, энерговыделение со временем уменьшается, а энерговыделения отвержденных РАО на 2—3 порядке выше, чем захораниваемых в жидком виде.

Первоначально теплофизические расчеты выполнялись по упрощенной схеме (задача теплопроводности стержня). В последующем были получены аналитические решения уравнения теплопроводности и выполнены конечно-разностные расчеты для условий, максимально приближенных к реальным.

Таблица 3.12

Энергетическая характеристика РАО (1 Ки/л)

№№ п/п	Нуклид	Период полураспада материнского нуклида, годы	Энергия на актив- ность распада, мэВ	Относи- тельное содер- жание, %	Энерговыведение Вт/м³		
					0	1 год	10 лет
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Стронций + итрий-90	29,12	1,126	23	0,79	0,77	0,60
2.	Цирконий + ниобий-95	0,18	1,655	1	0,04	<0,01	~ 0
3.	Рутений + родий-106	1,01	1,615	22	1,07	0,54	~ 0
4.	Цезий + барий-137	30	0,745	14	0,31	0,30	0,24
5.	Цезий-134	2,06	1,72	9	0,46	0,33	0,01
6.	Церий + празеодим-144	0,78	1,34	24	0,98	0,4	~ 0
7.	Прометий-147	2,62	0,064	7	0,01	<0,01	~ 0
				100	3,66	2,35	0,85

Таблица 3.13

Энерговыведение РАО различного типа

Вид отходов	Активность, Ки/л	Энерговыведение, Вт/м³		
		0	1 год	10 лет
1	2	3	4	5
Низкоактивные	10^{-9}	$3,66 \cdot 10^{-9}$	$2,35 \cdot 10^{-9}$	$0,875 \cdot 10^{-9}$
Среднеактивные	10^{-5}	$3,66 \cdot 10^{-5}$	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$0,857 \cdot 10^{-5}$
Высокоактивные	1	3,66	2,35	0,857
Высокоактивные (отвержденные)	500	1830,0	1175,0	428,5

Как показывают результаты расчётов, выполненных с учетом движения источников энерговыведения в пласте-коллекторе, явлений гидравлической дисперсии, накопления и задержки нуклидов в породах, кинетических явлений, кондуктивного теплопереноса по радиусу, по вертикали и т.д., температура разогрева пласта в наибольшей степени зависит от энерговыведения отходов и активности в единице объема пласта-коллектора и, соответственно, накопления нуклидов в породах, нуклидного состава, мощности пласта-коллектора. Расход нагнетания влияет, в основном, на положение максимума разогрева в пласте-коллекторе относительно скважины.

Теплофизические свойства пород и отходов, открытая пористость, кинетика процессов и ряд других факторов в значительно меньшей степени определяют температуру разогрева.

Исследования рассмотренных моделей выполнялись на различных стадиях обоснования, проектирования и эксплуатации полигонов захоронения, оценках последствий захоронения и безопасности.

Сопоставление выполненных прогнозов, полученных с использованием моделей показало вполне удовлетворительную сходимость и рассмотрено в главе 5. В таблице 3.4.3 приведена обобщенная характеристика моделей процессов глубинного захоронения РАО.

Применение моделей геологической среды и процессов захоронения для оценки безопасности захоронения РАО имеет свои особенности. В частности, рассмотренные детерминированные модели преобразуются в концептуально-вероятностные, в которых некоторые параметры заменяются на их вероятностные распределения [57]. Более подробно эти модели рассмотрены в следующем разделе.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Охрана здоровья работников предприятий и населения, проживающего в районе их размещения, являлось и продолжает являться главной целью деятельности по захоронению жидких РАО, включая этапы предварительных проработок, исследований, обоснований, проектирования, строительства, эксплуатации и консервации. Достижение этой цели напрямую связано с обеспечением безопасности захоронения РАО, под которой понимается свойство системы захоронения предупреждать или ограничивать воздействие отходов на человека. Безопасность является составной частью комплексного свойства системы — надежности, включающего также готовность, восстанавливаемость, ремонтпригодность и т.д. [58].

Основные критерии безопасности обращения с РАО определяются степенью воздействия на людей как при нормальной работе технологических систем, так и при возможных отклонениях, включая аварийные ситуации, а также вероятностью возникновения аварийных ситуаций.

В соответствии с законодательными актами и нормативными документами, в том числе действующими в России, рекомендациями международных органов установлены дозовые пределы облучения населения, проживающего в районе

Характеристика моделей процессов глубинного захоронения жидких РАО

№№ п/п	Основные процессы, сопровожающие захоронение	Последствия процессов	Параметры, опре- ляющие протекание процесса	Математические модели и методы их исследования	Масштабы проявления
1	2	3	4	5	6
1	Изменение водона- порного режима пласта-коллектора	Формирование ку- пола репрессии и во- ронки депрессии (при разгрузке), из- менение направле- ний и скорости тече- ний жидкости	Коэффициенты фильтрации и пьезо- проводности, водо- проводимость, ре- жимы и объемы нагнетания, гранич- ные условия	Уравнения фильтра- ции, его аналитичес- кие и конечно-раз- ностные решения	Изменение напоров пласта-коллектора в период нагнетания на площади до 100 км ²
2	Заполнение пласта- коллектора отхода- ми и их последую- щая миграция	Вытеснение вод от- ходами из порового пространства, сме- шение с подземны- ми водами, переход нуклидов в породы в результате физи- ко-химических явле- ний, радиационный распад нуклидов	Поле напоров, удель- ная емкость (эф. мощность и пори- стость) пласта, ко- эффициенты диспер- сии и межфазного распределения, фильтрационная не- однородность	Уравнения фильтра- ции и массопереноса, аналитические и ко- нечно-разностные ре- шения	Распространение от- ходов в пласте-кол- лекторе на площади 1—3 км ² в период экс- плуатации полигона до 10 км ² в период по- следующей выдержки
3	Изменение геостати- ческого состояния	Изменение пласто- вого давления и рас- пределение напряже- ний в геологической среде	Поле напоров в пласте, горное дав- ление, физико-меха- нические свойства пласта	Система уравнений напряженного состоя- ния геологической среды, аналитические и конечно-разностные решения	Практически не влияет

№№ п/п	Основные процессы, сопровожающие захоронение	Последствия процессов	Параметры, опреляю- щие протекание процесса	Математические модели и методы их исследования	Масштабы проявления
1	2	3	4	5	6
4.	Изменение темпера- туры геологической среды	Формирование об- ласти разогрева пласта-коллектора	Режимы нагнетания отходов и их состав, емкостные характе- ристики пласта-кол- лектора, коэффици- енты распределения, теплоемкость и теп- лопроводность	Уравнение теплопро- водности, аналитичес- кие и конечно-раз- ностные решения	Формирование облас- ти прогрева в районе нагнетательных сква- жин на площади 200— 300 м ²

предприятий атомной промышленности (категория Б) [6]. Тем самым допускается облучение людей сверх естественного фона, но ниже устанавливаемых уровней. При этом считается, что такое облучение не окажет значимого воздействия на людей на фоне других воздействий естественного и техногенного характера. Одновременно рекомендуется не допускать любого необоснованного облучения, обеспечивать облучение на возможно низком уровне.

Глубинное захоронение жидких РАО в наиболее полной степени отвечает последней рекомендации, так как предполагает исключение какого-либо облучения населения в результате захоронения отходов. При этом дозовая нагрузка на население будет равна «0». Непосредственное воздействие глубинного захоронения на население проявится как ограничение пользования недрами в месте захоронения, что не являетсяременительным в подавляющем большинстве случаев.

Таким образом, двумя главными требованиями к надежности и безопасности захоронения жидких РАО, вытекающими из условия предупреждения воздействия отходов на людей, является ограничение распространения компонентов отходов в пределах заранее устанавливаемых границ геологической среды и ограничение пользования недрами в пределах этих границ. При выполнении этих требований какой-либо контакт отходов с человеком не будет иметь места.

Эти требования относятся прежде всего к нормальным условиям осуществления захоронения, включая «проектные» аварийные ситуации. При «запроектных» аварийных ситуациях, связанных с редкими природными явлениями типа падения метеорита или последствиями деятельности человека — военное нападение, диверсии и др., возможен выход радиоактивности за пределы установленных границ в результате, например, разрушения поверхностного оборудования работающей нагнетательной скважины, трубопровода и т.д., однако и в этом случае область воздействия отходов будет ограничена санитарно-защитной зоной, в которой может находиться только производственный персонал.

Соответственно основным критерием безопасности захоронения жидких РАО является локализация отходов в пределах установленных объемов геологической среды — в границах горного отвода недр и санитарно-защитных зон. Для проверки выполнения основного критерия на промежуточных стадиях осуществления захоронения проводится сопоставление фактических данных о распространении отходов и протекающих процессах с контрольными границами и параметрами, уста-

навливаемыми на основании прогнозов. В таблице 3.15 приведена схема формирования требований и критериев безопасности захоронения жидких РАО.

Выполнение требований безопасности с использованием указанных критериев являлось и является одним из главных направлений деятельности при осуществлении захоронения жидких РАО.

Впервые идеи безопасности захоронения были сформулированы при обосновании и создании первых полигонов и были близки приведенным выше. В последующем эти идеи были развиты и дополнены методами математического прогнозирования с использованием элементов теории вероятности. Ниже рассмотрены основные методические вопросы оценки безопасности.

При оценке и доказательстве безопасности захоронения необходимо ответить на ряд вопросов примерно следующего содержания:

- на каком основании считается, что отходы будут локализованы в пределах установленных объемов геологической среды?

- какова гарантия, что это требование будет выполнено, или какова вероятность невыполнения этого требования?

- что произойдет, если отходы по каким-либо причинам выйдут за пределы установленных границ, каковы эти причины и можно ли их устранить?

- можно ли контролировать захоронение, т.е. знать в любой момент времени, где отходы и что с ними происходит?

- можно ли управлять отходами в недрах или воздействовать на их состояние?

- что делать после завершения захоронения отходов, можно ли выполнить консервацию мест захоронения?

Ответы на эти вопросы целесообразно формулировать с учетом основных факторов, определяющих безопасность захоронения, в том числе:

- естественных изолирующих свойств геологических формаций;

- процессов взаимодействия отходов с геологической средой;

- технических решений схем, режимов и инженерных систем захоронения отходов;

- безопасных режимов эксплуатации, контроля и управления захоронением;

- состояния геологической среды после консервации систем захоронения.

Требования и критерии безопасности глубинного захоронения жидких РАО

ГЛАВНАЯ ЦЕЛЬ	НЕДОПУСТИМОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАО НА ЧЕЛОВЕКА И ОБЪЕКТЫ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ	
Основные требо- вания:	Распространение отходов только в заранее устанавливаемых границах геологической среды. Ограничение пользования недрами в установленных границах.	
Основные критерии безопасности:	Соответствие масштабов распространения отходов в геологической среде, параметров протекающих процессов установленным контрольным границам и уровням.	
Основные этапы достижения цели:	Исследование, обоснование и проектирование.	Эксплуатация системы захоронения
	Формирование требований к геологической формации, пригодной для захоронения	Установление горного отвода недр и санитарно-защитных зон
	Проверка выполнения требований проведением геолого-разведочных работ и исследований	Контроль распространения отходов в недрах и параметров процессов.
	Обоснование и проектирование системы захоронения, удовлетворяющей основным требованиям.	Сопоставление фактических данных контроля с контрольными границами и уровнями, формулирование выводов о безопасности захоронения.
	Обоснование режимов захоронения отходов, определение контрольных границ и уровней, системы контроля	Оптимизация режимов захоронения. Контроль за использованием недр в районе захоронения.
	Анализ гипотетических осложнений и аварийных ситуаций, разработка мероприятий по их предупреждению.	Проведение противоаварийных мероприятий на основании данных контроля.

Естественные изолирующие свойства геологической среды в первую очередь определяются:

- способностью глинистых слабопроницаемых слоев разреза преграждать распространение отходов выше пласта-коллектора и буферного горизонта;

- низкими скоростями естественного движения подземных вод в пласте-коллекторе, благодаря которым отходы не смогут переместиться на значительное расстояние от места захоронения;

- более или менее равномерным распределением емкостных и фильтрационных свойств по разрезу пласта-коллектора, отсутствием маломощных зон аномально высокой проницаемости, из-за которых нагнетаемые отходы могут распространяться на большие расстояния;

- способностью пород задерживать распространение нуклидов — компонентов отходов.

Для оценки этих свойств проводят прогнозные расчеты с использованием моделей геологической среды и процессов захоронения.

На предварительной стадии оценки безопасности выполняются приближенные расчеты с использованием упрощенных методик и фондовых материалов. Большое значение для водов о безопасности захоронения имеют качественные признаки, свидетельствующие об изолированности геологических формаций, — гидрогеохимическая и гидрогеодинамическая зональность этажно-расположенных горизонтов, насыщение пласта-коллектора рассолами, отсутствие в районе возможного влияния захоронения зон активных тектонических нарушений, по плоскостям которых возможна связь горизонтов, низкая естественная сейсмичность и ряд других.

Предварительная оценка безопасности позволяет принять решение о проведении специальных геолого-разведочных работ и исследований, в результате которых получают необходимые данные для количественной оценки безопасности и в которую входят моделирование и многовариантные прогнозные расчеты, позволяющие установить масштабы распространения отходов при различных значениях параметров геологической среды и захоронения, определить границы горного отвода недр и необходимые ограничения пользования ими.

Статистическая обработка результатов геолого-разведочных работ, определение видов и характеристик вероятностных распределений позволяют сформулировать концептуально-вероятностные модели геологической среды, в которых одни

параметры выражаются постоянными, а другие вероятностными распределениями [57]. Вероятностный характер распределения некоторых параметров геологической среды обусловлен их естественной изменчивостью и неизбежными ошибками определения.

Использование таких моделей позволяет получать набор результатов, каждому из которых соответствует определенный набор параметров и граничных условий. Полученные результаты решения прогностических задач отличаются вероятностью реализации.

Использование концептуально-вероятностных моделей позволяет определить вероятность отклонения возможных схем геологических условий от принятых при прогнозах и, соответственно, вероятность аварийных ситуаций (см. ниже).

Выбор параметров и характеристик для представления в виде постоянных значений или вероятностных распределений проводится на основе анализа степени изменчивости параметров (анализ неопределенности) и влияния параметра на конечные результаты (анализ чувствительности). Анализ чувствительности и неопределенности может выполняться также для оценки достаточности и качества данных, получаемых при геолого-разведочных работах и исследованиях и используемых для оценки безопасности. Так, значительный разброс (дисперсия) параметра, например, водопроницаемости или коэффициента фильтрации от средних значений или трендовой поверхности может свидетельствовать о неадекватности модели распределения в пространстве фактической картине или погрешностях методики определения.

Как показывает практический опыт, наиболее важными параметрами моделей, влияющими на конечный результат, являются фильтрационные свойства пласта-коллектора и перекрывающих слабопроницаемых пород, мощность и пористость последних, распределение фильтрационных свойств по разрезу пласта-коллектора (наличие зон аномально — высокой проницаемости), уклон естественного потока. Наиболее изменчивыми из них являются фильтрационные свойства, в отдельных случаях — мощность водоупора. В то же время уклон естественного потока определяется достаточно точно и характеризуется малой дисперсией. Емкостные свойства пласта-коллектора с учетом процессов взаимодействия хотя и характеризуются большой изменчивостью, но в связи с принятием при расчетах большого «запаса надежности» в меньшей степени влияют на оценку безопасности.

Прогнозные расчеты для крайних значений параметров, в том числе при самом неблагоприятном их сочетании,

вероятность которого может быть определена, позволяют оценить последствия захоронения в случае неверной оценки геологических условий. Вероятность реализации этих последствий характеризует степень обоснованности прогнозов для средних значений параметров геологической среды, границ горного отвода недр.

Подобный анализ геологических условий захоронения и результатов геолого-разведочных работ позволяет ответить на вопросы об обоснованности утверждений о локализации отходов в пределах устанавливаемых границ геологической среды и о гарантии выполнения этого условия, о причинах и последствиях возможных ошибок в оценке геологических условий захоронения.

При исследовании безопасности процессов взаимодействия отходов с геологической средой применяются те же подходы, поскольку характеристики процессов взаимодействия являются параметрами моделей процессов захоронения, такими как эффективная пористость, коэффициент распределения, степень десорбции нуклидов и т.д.

Наибольшее внимание при анализе процессов взаимодействия привлекают явления, которые могут снизить уровень безопасности захоронения, в том числе: разогрев пласта-коллектора из-за энерговыделения радиоактивного распада, газообразование в результате радиационно-химических или других процессов, концентрирование в породах трансурановых нуклидов и возможность возникновения СЦР (самопроизвольной цепной реакции).

Прогнозные расчеты температуры разогрева позволяют определить предельные содержания нуклидов в отходах при заданных их составах, параметрах пласта-коллектора, режимах нагнетания, накоплений нуклидов в породах и определить требования к подготовке отходов к захоронению, в том числе установить максимально допустимую активность. Расчеты выполняются для различных вероятных значений параметров, что позволяет оценить качество исходных данных и надежность результатов. Как показывают сопоставления результатов расчетов с фактическими данными контроля захоронения (см. р.5.1), они достаточно хорошо совпадают.

В связи с обратимостью радиационно-химических процессов в условиях закрытого порового пространства пласта-коллектора, давлением в пласте-коллекторе до нескольких МПа, формирующиеся объемы газов радиационно-химического происхождения в пласте невелики, что также подтверждается результатами наблюдений. Вместе с тем возможно интенсивное газовыделение, например, в результате деятельности денит-

рифицирующих бактерий. Подобные процессы могут быть выявлены на стадии лабораторных исследований процессов взаимодействия отходов с геологической средой и предупреждены соответствующей подготовкой отходов. Как показывают расчеты, возникновение СЦР практически невозможно при захоронении жидких РАО.

Наиболее полная и последовательная оценка безопасности осуществляется на стадии разработки Технико-экономического обоснования (ТЭО) и проекта, в составе которых или в виде отдельной работы проводится оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), включающая оценку безопасности.

Результаты геолого-разведочных работ и анализ опыта нефтяной промышленности позволяют на стадии ТЭО обосновать окончательный вариант моделей гидрогеологических условий и процессов захоронения, и их параметры, провести прогнозные расчеты для различных условий захоронения с определением границ распространения отходов, полей напоров, содержаний компонентов, температур, которые являются основой для установления границ горного отвода недр и санитарно-защитных зон, проводимых в них природоохранных мероприятий.

Особое место при оценке безопасности на этой стадии занимает анализ гипотетических осложнений и аварийных ситуаций, включающий разработку перечня осложнений и аварийных ситуаций, сценариев их развития, прогнозные расчеты, оценку вероятности реализации и последствий, поиск способов предупреждения.

Под аварийной ситуацией понимается возникновение обусловленных захоронением жидких РАО явлений или процессов, угрожающих здоровью людей и нормальному осуществлению их хозяйственной деятельности, способных нанести ущерб экосфере и требующих принятия неотложных мер по их прекращению. Под осложнением понимаются явления, препятствующие эксплуатации полигона захоронения в регламентных режимах и требующих проведения специальных мероприятий.

При анализе гипотетических аварийных ситуаций обычно рассматриваются все мыслимые и немыслимые сценарии, даже невероятные, что необходимо для демонстрации безопасности захоронения жидких РАО перед населением, местной администрацией и контролирующими органами, в составе которых большинство работников не являются специалистами в области геологии и охраны подземных вод.

Гипотетические аварийные ситуации по характеру вызвавших их причин могут быть подразделены на следующие типы:

— связанные с ошибками в оценке емкостных и изолирующих свойств геологической среды, с использованием моделей гидрогеологических условий, принципиально отличных от фактических;

— обусловленные изменением геологических условий мест захоронения вследствие естественных преобразований геологической среды, в том числе горообразования, усиления тектонической активности и т. д.;

— являющиеся следствием развития в пласте-коллекторе и перекрывающих образованиях процессов, обусловленных захоронением;

— развивающиеся вследствие повреждения или ухудшения технического состояния скважин и поверхностного оборудования;

— вызванные ошибками работников (персонала) при эксплуатации систем захоронения;

— возникшие в связи с активным воздействием человека: бурение скважин со вскрытием пласта-коллектора, проходка горных выработок, военные действия, диверсии;

— связанные со стихийными бедствиями типа тайфунов, смерчей, наводнений и сверхредкими событиями типа падения крупных метеоритов, самолетов.

Ошибки в оценке геологических условий могут иметь место при недостаточной изученности условий залегания пласта-коллектора, его пористости, эффективной мощности, фильтрационных свойств, в том числе вертикальной фильтрационной неоднородности, характеристик естественного потока подземных вод. Последствием этих ошибок будет распространение отходов в пласте-коллекторе, превышающее прогнозное, например, по маломощным слоям аномально-высокой проницаемости, не выявленных на стадии предварительных исследований, миграция компонентов с естественным потоком подземных вод на большие расстояния.

Подобные явления обнаруживаются на начальной стадии осуществления захоронения по данным контрольных наблюдений, что позволяет принять соответствующие меры вплоть до прекращения эксплуатации полигона. Собственно аварийные ситуации, связанные с воздействием радиоактивности на население и биоту, не будут иметь места, поскольку отходы останутся локализованными в пределах пласта-коллектора, однако на большей площади, чем предполагалось.

Для предупреждения подобных ошибок проводятся геолого-разведочные работы с полным комплексом исследований, включающим длительные откачки и нагнетания воды с оп-

ределением реакции уровней на значительном удалении от центральной скважины, индикаторные исследования.

Ошибки в оценке изолирующих свойств слабопроницаемых горизонтов, перекрывающих пласт-коллектор, могут привести к попаданию отходов и вышележащий буферный горизонт, что также не является аварийной ситуацией, так как компоненты отходов будут находиться в пределах горного отвода недр. Вероятность таких ошибок в оценке фильтрационных и изолирующих свойств геологической среды определяется с использованием методических подходов, приведенных ниже в настоящем разделе, и характеризуется значениями $10^{-6} \div 10^{-7}$, что вполне приемлемо.

Тектонические нарушения в пределах области распространения отходов могут явиться причиной вертикального распространения отходов вплоть до неглубокозалегающих горизонтов, если плоскости тектонических нарушений проницаемы и пересекают все вышележащие горизонты. Однако процессы вертикальной миграции компонентов отходов по тектоническим зонам весьма замедлены, буферный горизонт является резервной емкостью на пути вертикальной миграции отходов, что позволяет избежать аварийной ситуации, хотя осложнения могут быть весьма тяжелыми.

Применяемые методики геолого-разведочных работ и исследований, приведенные выше, позволяют избежать подобных ошибок, как и неправильных проектных решений, связанных с недоучетом геологических условий.

Такие ошибочные проектные решения, как размещение полигона захоронения вне пределов разведанного участка, неправильный выбор интервалов, объемов и давлений, количества нагнетательных и наблюдательных скважин, объемов контроля также не приводят к аварийным ситуациям, выявляются на начальной стадии эксплуатации полигона. Для предупреждения подобных ошибок осуществляется экспертирование технико-экономических обоснований и проектов с привлечением независимых специалистов.

Естественные изменения геологической среды подразделяются на экзогенные, связанные с изменением климата, деятельностью рск, развитием оврагов, оползней, движений ледников, и эндогенные, протекающие в мантии земли и воздействующие на литосферу.

Экзогенные процессы затрагивают верхние части геологической среды и играют существенную роль в преобразовании поверхности земли. Для коллекторских горизонтов, залегающих на глубинах несколько сот метров и более, они мало-значимы.

Эндогенные процессы являются основной причиной формирования тектонической и неотектонической структуры, воздымания и опускания участков поверхности, возникновения землетрясения.

Усиление тектонической активности может привести к оживлению существующих тектонических нарушений и образованию новых, по проницаемым плоскостям которых возможна взаимосвязь между горизонтами, вертикальная миграция компонентов отходов. Усиление тектонической активности не происходит внезапно, ей предшествует длительный период, сопровождающийся подъемами и опусканием поверхности, значительным увеличением сейсмичности. Полигоны захоронения расположены в платформенных областях, где подобные явления не произойдут, по-видимому, в течении ближайших десятков и сотен тысяч лет.

Еще больший период времени потребуется для подъема поверхности и эрозии геологических образования до пластов-коллекторов, содержащих отходы. Подобные явления будут сопровождаться развитием магматизма, образованием интрузий и эффузий магматических пород с выносом отходов на поверхность. Для областей платформы эти процессы находятся за пределами разумного времени прогнозирования. Развития магматизма может сыграть и положительную роль в локализации отходов в пласте-коллекторе, поскольку при увеличении температуры, давления и внедрении магматических пород и гидротермальных растворов происходит значительное снижение осадочных пород, преобразование их в скальные породы типа скарнов, гнейсов.

Как уже упоминалось выше, землетрясения практически не оказывают воздействие на глубокозалегающие горизонты, за исключением проявления сейсмодислокаций в сейсмоактивных районах, где захоронение жидких РАО не проводится.

При захоронении жидких РАО развиваются потенциально-опасные процессы, которые при неблагоприятном сочетании могут привести к аварийным ситуациям и осложнениям. Увеличение температуры пласта-коллектора до значений парообразования в пластовых условиях (для глубин 350—450 м 250—350° С) приведет к появлению парогазовой фазы и повышению давления на устье скважин, находящихся в центральной части области разогрева. Поскольку пласт-коллектор является открытой системой, давление на устье скважины не превысит пластовое или гидростатическое.

Аварийная ситуация произойдет при внезапном разрушении оголовка скважины, находящейся под давлением, напри-

мер, в результате диверсии, военного нападения. Последствием аварийной ситуации будет являться загрязнение ограниченного участка поверхности в районе скважины в пределах I пояса санитарно-защитной зоны. Выход парогазовой фазы и излив газированной загрязненной жидкости будет сопровождаться уменьшением температуры зоны разогрева пласта-коллектора, снижением интенсивности парообразования до полного его прекращения. Аналогичный сценарий может иметь место и при образовании газа в пласте-коллекторе вследствие, например, радиационно-химических процессов.

Для предупреждения возникновения предпосылок подобных аварийных ситуаций осуществляется регулирование накопления и концентрирования нуклидов в породах путем подготовки отходов к захоронению и предварительной обработки пласта-коллектора, ограничивается максимальное содержание нуклидов в высокоактивных отходах, применяется соответствующий режим их нагнетания. Опыт захоронения высокоактивных отходов показывает, что ограничение предельной температуры разогрева пласта-коллектора достаточно эффективно.

При анализе безопасности захоронения РАО вызывает опасение концентрирование в породах пласта-коллектора компонентов, способных создать взрывоопасные условия, прежде всего трансурановых эдлементов и особенно плутония, находящегося в отходах в неизвлекаемых микроконцентрациях. Как показывает выполненный анализ, для возникновения самопроизвольной цепной реакции (СЦР) необходимо формирование в пласте-коллекторе локальной области или зоны, содержащей металлический плутоний-239 или высококонцентрированный его раствор. Размеры зоны должны быть не менее 10 см, в среде плутония не должны находиться горные породы, пластовые воды, компоненты отходов. Подобные условия практически не могут возникнуть в пласте-коллекторе. Если допустить развитие СЦР, то последствием этого явления будет увеличение температуры, газообразования, но отнюдь не ядерный взрыв. Нормирование содержаний трансурановых нуклидов в РАО, направляемых на захоронение, является дополнительной гарантией ядерной безопасности.

Растворение пород пласта-коллектора агрессивными компонентами отходов, например, кислотами, может привести к разуплотнению прифилтровой зоны пласта и вышележащих пород, примыкающих к стволу скважины, что создаст предпосылки для затрубных перетоков. Как показывают физико-химические исследования захоронения слабокислых высокоактивных отходов частичному ратворению подвергаются гли-

нистые минералы, содержащиеся в песчаных породах пластов-коллекторов в количестве 3—5%, в меньшей степени полевые шпаты. Кварцевые зерна, составляющие 70—80% в объеме пород, не подвергаются растворению, может изменяться только их поверхность.

В результате воздействия слабокислых растворов несколько увеличивается пористость пород, разуплотнение пород пласта-коллектора не происходит. Глинистые породы перекрывающих пласт-коллектор слабопроницаемых горизонтов практически не подвержены воздействию слабокислых растворов ввиду незначительных масштабов развивающихся в них фильтрационных процессов.

Коллекторские породы, сложенные известняками, будут, очевидно, подвержены большим изменениям при нагнетании растворов кислот. Захоронение жидких РАО в кислой среде в подобные горизонты не проводится.

Изменение пластовых давлений при нагнетании отходов и связанные с этим геодинамические явления при неблагоприятных условиях могут вызвать определенные осложнения, например, сейсмичность в виде слабых землетрясений. Землетрясения не приведут к развитию аварийных ситуаций, разрушению зданий или ухудшению изоляции отходов в пласт-коллекторе, однако вызовут протесты населения, контролирующих органов.

Причины возникновения вызванной сейсмичности рассмотрены в разделе 2. Для предупреждения подобных явлений полигон захоронения жидких РАО не должен располагаться в сейсмически-активных областях и в непосредственной близости от тектонических нарушений, контактирующие блоки которых сложены скальными породами и находятся в напряженном состоянии. Верхний предел давления нагнетания отходов должен ограничиваться.

Аварийные ситуации и осложнения, связанные с попаданием отходов в неглубокозалегающие горизонты и на поверхность, могут иметь место при ухудшении технического состояния скважин, в частности, нарушении герметичности обсадных колонн и образование «свищей» при совпадении места негерметичности колонны с интервалом отсутствия цемента в заколонном пространстве. Низкое качество затрубной цементации обсадных колонн, в том числе ленточное распространение цементного камня в заколонном пространстве, наличие в камне каналов, трещин является причиной вертикальных перетоков отходов и пластовой жидкости по затрубному пространству скважин, их поступления в буферный, а иногда и вышезалегающие горизонты.

В результате происходит загрязнение горизонтов выше пласта-коллектора, которое, однако имеет ограниченные масштабы в связи с относительно высоким фильтрационным сопротивлением мест утечек. Загрязнение находится в пределах горного отвода недр.

Для предупреждения и своевременного обнаружения подобных явлений предусматриваются специальные мероприятия, рассмотренные в следующем разделе.

Выход из строя поверхностного оборудования — оголовков скважин, трубопроводов, насосов может иметь более серьезные последствия, особенно если произойдет внезапное разрушение работающего оборудования и находящегося под давлением, систем сбора и канализирования протечек. В результате разлива растворов произойдет загрязнение поверхности, в пределах I пояса санитарно-защитной зоны. Вместе с тем течи трубопроводов, насосов и устьевого оборудования скважин являются проектными аварийными ситуациями. Принимаемые проектные решения направлены на их локализацию.

Внезапное разрушение устьевого оборудования скважины, находящейся под давлением, приведет к изливу отходов на поверхность, который будет продолжаться до снижения напора ниже поверхности земли. Время разлива зависит от режима предшествующего нагнетания отходов, величины напора, плотности отходов и подземных вод и оценивается значениями от нескольких часов до недель и месяцев. Минимальный разлив будет иметь место при разрушении оборудования скважины, в которую удаляются высокоактивные отходы. Это обусловлено кратковременным периодом их удаления и нагнетанием преимущественно в режиме свободного налива при положении уровня ниже поверхности земли, отсутствием подпора на скважине в промежутках между нагнетаниями. При разрушении оборудования скважины, в которую удаляются среднеактивные отходы, излив не превысит нескольких часов, что связано с относительно малыми давлениями нагнетания и развивающимися напорами, высокой плотностью отходов.

В составе штатного оборудования полигона захоронения предусматриваются технические средства и материалы для «глушения» скважины путем заполнения ствола тяжелым солевым раствором вытесняющим отходы из ствола скважины в пласт-коллектор. Выполнение таких работ может потребоваться прежде всего на скважинах, в которые удаляются низкоактивные отходы, характеризующиеся большими объемами и давлениями нагнетания, чем среднеактивные, и имеющие

плотность близкую или меньшую чем пластовые воды, в том числе соленые.

Ошибки персонала при эксплуатации полигона захоронения, связанные с неправильными действиями по переключению систем, недосмотрами за составлением арматуры рассматриваются в качестве причин проектных аварийных ситуаций, предусмотренные средства контроля и сбора протечек позволяют предупредить развитие аварий, связанных с ошибками такого рода. Наиболее серьезные последствия могут иметь последствия направления на захоронение некондиционных отходов, особенно средне- и высокоактивных. Последствием этого может быть перегрев пласта-коллектора, интенсивное газообразование и осложнения, рассмотренные выше. Для предупреждения подобных явлений осуществляется строгий контроль выполнения требований регламента.

Причиной аварийной ситуации может быть деятельность людей в местах захоронения РАО: проведение буровых и горных работ со вскрытием пласта-коллектора, содержащего отходы, целенаправленное или случайное разрушение поверхностного оборудования, находящегося в рабочем режиме.

Ограничение пользования недрами в районе захоронения, контроль за его выполнением предотвращает несанкционированный доступ к отходам как в процессе эксплуатации полигона, так и после его консервации. Бурение глубоких скважин и проходка горных выработок являются сложным и длительными мероприятиями и не могут быть осуществлены без ведома контролирующих организаций. Отсутствуют какие-либо объективные причины проведения в районах полигонов подобных работ, не связанных с захоронением.

Диверсии, военное нападение, падение воздушных транспортных средств может привести к разрушению поверхностного оборудования. Если это произойдет в период нагнетания отходов, то будет сопровождаться изливом отходов и загрязнением поверхности в пределах I пояса санитарно-защитной зоны. При заблаговременном предупреждении о военном нападении или при длительной приостановке захоронения возможно опорожнение трубопроводов и насосных станций, глушение скважин тяжелыми солевыми растворами. В этом случае излив отходов и загрязнение поверхности не произойдет.

После консервации полигона захоронения и ликвидации поверхностного оборудования подобные воздействия не окажут влияние на условия изоляции отходов в пласте-коллекто-

ре. После тампонирования стволов скважин отходы будут находиться не выше кровли пласта-коллектора.

Природные явления типа тайфунов, смерчей, наводнений, падения метеоритов могут повредить поверхностные сооружения полигона захоронения и привести к загрязнению поверхности, если эти события произойдут в период нагнетания отходов. После консервации полигона подобные явления не окажут воздействия на отходы.

Как следует из приведенного анализа, возможные последствия гипотетических осложнений и аварийных ситуаций характеризуются весьма ограниченным влиянием на окружающую среду и могут проявиться в объемах горного отвода недр или в пределах I пояса санитарно-защитной зоны полигона, где запрещается любая деятельность, не связанная с захоронением. Аварийные ситуации при захоронении весьма маловероятны, их последствия по своим масштабам не сопоставимы, например, с аварией ядерного реактора с разрушением активной зоны, поверхностного хранилища жидких высокоактивных РАО.

Последствия возможных аварийных ситуаций и осложнений при глубинном захоронении могут быть оценены с использованием шкалы событий на АЭС, предложенной МАГАТЭ в 1990 г. (JNES).

Выделяются 7 уровней возможных событий на АЭС.

Глобальная авария уровня 7 типа Чернобыльской с выбросом большого количества радиоактивности в окружающую среду и воздействием на население, тяжелая авария уровня 6 типа аварии в Виндскейле, Англия, 1957 г. с выбросом радиоактивности в окружающую среду, авария уровня 5 с последствиями для окружающей среды типа аварии в Три Майл Айленд, США, 1979 г. авария уровня 4 в пределах АЭС с облучением отдельных лиц из населения уровня 4, например, авария Сент-Лаврент, Франция, 1980 г. серьезное происшествие уровня 3 с облучением отдельных лиц из населения и персонала, например, авария Ванделсос в Испании в 1989 г. происшествие средней тяжести уровня 2, обусловленное потенциально-опасным отклонением от нормальной эксплуатации, незначительное происшествие уровня 1, связанное с функциональными отклонениями систем, которые не являются опасными.

В соответствии с приведенным анализом возможные аварийные ситуации при захоронении жидких РАО будут не выше уровня 3, причем облучения населения не произойдет.

Гипотетические аварийные ситуации по причинам возникновения подразделяются на две группы:

— аварии, возникшие вследствие более интенсивного, по сравнению с прогнозными расчетами, развития процессов, связанных с подземным захоронением РАО, в том числе миграцией нуклидов, естественных изменений геологической среды, разогрева и т.д.;

— аварии, связанные с неблагоприятным сочетанием случайных, трудноучитываемых факторов, в том числе выход из строя скважин и поверхностного оборудования, неправильные действия персонала, стихийные бедствия и т.д.

Вероятность аварийных ситуаций первой группы оценивается с использованием концептуально-вероятностных моделей геологической среды. При оценке вероятностей II группы используются опыт эксплуатации аналогичных инженерных сооружений, данные статистики стихийных бедствий и катастроф.

Основные принципы определения вероятностей гипотетических осложнений и аварийных ситуаций с использованием статистических распределений параметров моделей рассмотрены выше, здесь приведены некоторые дополнительные сведения.

Для оценки возможных значений параметров применяется следующее выражение:

$$a_i \pm S_a \cdot t(f, \beta)$$

где a_i — выборочное среднее значение параметра;
 S_a — выборочная оценка среднеквадратичного отклонения среднего для параметра (оценка среднеквадратичного);
 t — коэффициент распределения Стьюдента;
 β — доверительная вероятность;
 $f = n - 1$ — число степеней свободы;
 n — число определений.

В том случае, если параметр распределен по логнормальному закону, вместо a_i , S_a принимают логарифмы их значений, при переходе от которых получают несимметричный интервал относительно среднего значения.

Под вероятностью возникновения аварийной ситуации понимается вероятность существования такого значения параметра модели, при котором аварийная ситуация будет иметь место. Критическое или предельное значение параметра, обуславливающее аварийную ситуацию, находится путем решения обратной прогностической задачи при условии, что аварийная ситуация произошла. Например, предполагается, что компоненты отходов достигли среды непосредственного обитания

в опасных концентрациях или произошел перегрев пласт-коллектора, и определяются значения параметров, при которых эти события реализуются. По известному вероятностному распределению параметра, основными характеристиками которого являются среднее значение \bar{a} и среднеквадратичное отклонение σ_p , находят соответствующий уровень значимости, которым определяется вероятность существования критического значения параметра, обуславливающие аварийную ситуацию.

Уровень значимости определяется по выражению

$$\alpha = 1 - \gamma \int_{-\infty}^b (1 - x^2)^{-\frac{f+1}{2}} dx$$

где

$$\gamma = \frac{\Gamma\left(\frac{b+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{f}{2}\right)}; \quad \Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{z-1} dy$$

$$b = \frac{t}{\sqrt{f}}; \quad f = n - 1; \quad t = \frac{a_n - \bar{a}}{S_a}$$

a_n — предельное или критическое значение параметра;

\bar{a} — выборочное среднее значение параметра;

S_a — выборочное среднеквадратичное отклонение среднего для параметра;

n — число определений параметра данной выработки.

За вероятность аварийной ситуации принимается вероятность существования предельного значения параметра, от которого зависит развитие данной ситуации.

Величины a_n , \bar{a} , S_a , n получают на основании статистической обработки данных определений значений параметров при геолого-разведочных работах и физико-химических исследованиях или анализе концептуально-вероятностных моделей геологической среды и процессов захоронения, включающих сведения о вероятностных характеристиках параметров. Если вероятностные распределения параметров аппроксимируются логнормальным или подобным ему законом распределения, под a_n , \bar{a} , S_a принимаются логарифмы соответствующих значений. Возможно выделение не одного, а нескольких параметров, определяющих развитие аварийных ситуаций. При независимости параметров поочередно находится предельное значение каждого параметра и вероятность его существования

в предположении постоянства остальных параметров. Максимальная вероятность аварийной ситуации, обусловленной возможным совместным отличием параметров от принятых при прогнозах средних значениях, находится по выражению:

$$P = 1 - \prod_i^m (1 - \alpha_i)$$

где α_i — вероятность существования предельных значений i -го параметра.

Полученные значения вероятности сопоставляются с аналогичными данными для альтернативных технологий обращения с отходами основных производств, на основании чего принимаются выводы об относительной опасности или безопасности захоронения.

На стадии ТЭО и проектирования осуществляются также прогнозные расчеты для различных аномальных условий захоронения, что позволяет уточнить причины аварийных ситуаций, оценить их возможные последствия и предусмотреть необходимые мероприятия по их предупреждению и ликвидации последствий, оценить эффективность и стоимость этих мероприятий. Эти же данные используются для организации контроля захоронения, в составе которого особое внимание обращается на выявления начальных признаков и предпосылок развития осложнений и аварийных ситуаций.

Анализ безопасности захоронения жидких РАО для конкретных объектов приведен в разделе 5.

Основной задачей оценки и обеспечения безопасности на стадии строительства и подготовки к эксплуатации полигона захоронения является контроль качества всех проводимых работ и особенно строительства скважин, крепления их стволов, цементирования затрубного пространства.

При сооружении, геолого-геофизической документации и опробовании эксплуатационных скважин уточняются особенности геологического строения, позволяющие в ряде случаев откорректировать параметры моделей геологической среды и процессов захоронения, провести дополнительные прогнозные расчеты. Получаемые результаты используются для подготовки регламента эксплуатации полигона, обоснования объемов и состава контроля.

Оценка безопасности захоронения на стадии эксплуатации полигонов базируется на результатах контрольных наблюдений, выполняемых в соответствии с регламентом.

Не останавливаясь подробно на методике наблюдений, которая освещена в разделе 4, следует отметить, что главными

контролируемыми параметрами являются распределение компонентов отходов в пласте-коллекторе и сопутствующие процессы — изменение пластового давления, температуры. Контроль изменения пластового давления позволяет установить тенденции распространения отходов задолго до их появления в контролируемой скважине и оптимизировать процесс захоронения.

Результаты контрольных наблюдений сопоставляются с данными предварительных прогнозов, выполненных на стадии проектирования и при подготовке регламента на эксплуатацию. Прогнозы составляются для различных периодов времени, например для 1, 3, 5, 10, 15, 20 и т. д. лет после начала эксплуатации. Совпадение результатов контроля с прогнозами свидетельствует о нормальном характере процесса захоронения. Если фактические данные отличаются от прогнозов, выясняются причины, вызвавшие это отклонение, и принимаются решения об оптимизации режимов захоронения.

В качестве управляющих воздействий применяется изменение режимов нагнетания — включение или отключение нагнетательных и разгрузочных скважин, что позволяет в той или иной мере влиять на направление движения отходов в пласте-коллекторе.

Изменение составов отходов при их подготовке к захоронению дает возможность регулировать в определенной степени переход нуклидов в твердую фазу или десорбцию нуклидов движущейся пластовой жидкостью. Увеличение накопления нуклидов в породах и их закрепление достигаются обеспечением соответствующего температурного режима пласта-коллектора. Например, при увеличении температуры происходит разрушение растворимых комплексов в системе отходы — породы — пластовые воды, образование слаборастворимых соединений, захватывающих и соосаждающих нуклиды. В свою очередь температурный режим регулируется активностью отходов, кислотно-основными характеристиками среды, объемом и расходом нагнетания.

Для ограничения распространения нуклидов могут применяться противомиграционные завесы, создаваемые в пласте-коллекторе путем обработки его специальными реагентами и газовыми смесями.

Обеспечение безопасности после консервации полигонов захоронения достигается:

— соблюдением ограничений пользования недрами в пределах горного отвода недр и области локализации отходов в течение устанавливаемого периода времени;

- ликвидацией инженерных сооружений систем захоронения: скважин, трубопроводов, поверхностных сооружений;
- реабилитацией поверхности в пределах первого пояса санитарно-защитной зоны;
- осуществлением мониторинга недр в составе федерального или регионального мониторинга окружающей природной среды.

Дополнительное изучение геологической среды и процессов захоронения в период эксплуатации полигонов позволяет получить значительный объем информации, использование которой при уточненных прогнозах поведения отходов в недрах позволяет получить весьма надежные данные. На основании этих данных при разработке проекта консервации осуществляется оценка безопасности для постконсервационного периода, уточнение границ горного отвода (в сторону уменьшения объема отвода), системы мониторинга недр.

Осуществление мониторинга мест захоронения в постконсервационный период позволит обеспечить необходимую безопасность природопользования.

4. СИСТЕМЫ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

Системы глубинного захоронения жидких РАО, называемые также полигонами захоронения или подземными хранилищами, включают комплексы поверхностных и подземных сооружений, подсистемы контроля и управления, участок недр в пределах горного отвода недр и санитарно-защитных зон.

Основными функциями системы или полигона захоронения являются прием предварительно подготовленных отходов, нагнетание отходов в скважины, контроль объемов, составов и режимов нагнетания отходов, их распределения в пласте-коллекторе и состояние геологической среды, оптимизация эксплуатации полигона с целью обеспечения максимальной безопасности и минимального воздействия на окружающую среду. Функциональная схема полигона захоронения приведена на рис. 9.

Организация системы захоронения имеет много общего с нефтепромыслами, в то же время высокая потенциальная опасность отходов и связанная с этим специфичность решения производственных задач обусловили применение существенно отличных методических подходов и проектных решений, касающихся, в основном, обоснования и обеспечения безопасности

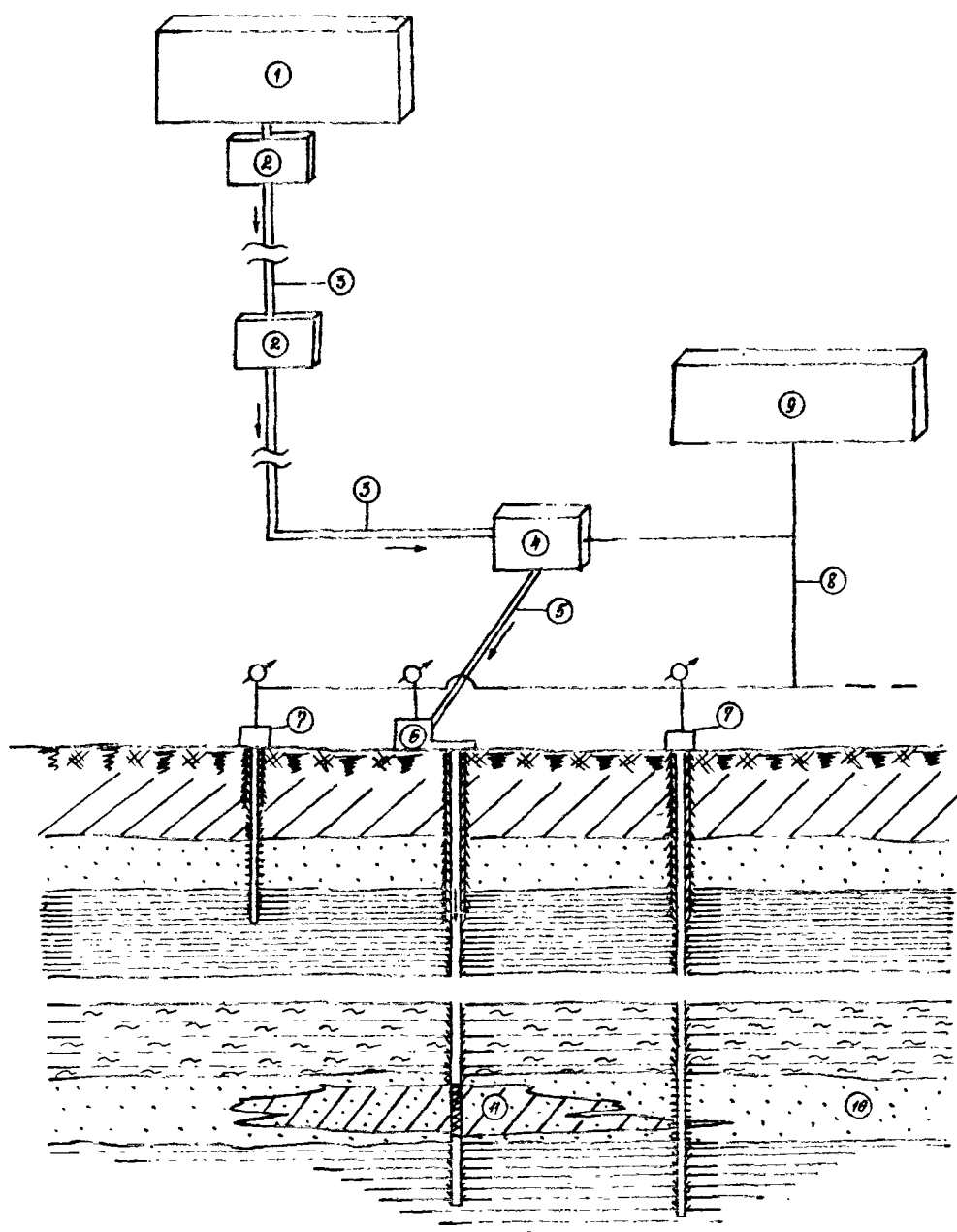


Рис. 9. Функциональная схема полигона захоронения жидких РАО

1—цех очистных сооружений, 2—насосные станции перекачки, 3—трубопроводы низкого давления, 4—здание приемных емкостей и насосной станции нагнетания, 5—трубопровод высокого давления, 6—нагнетательная скважина, 7—контрольно-наблюдательные скважины, 8—сбор данных контроля, 9—административно-техническое здание, 10—пласт-коллектор, 11—отходы в пласте-коллекторе

функционирования системы, технических требований и конструкции основных инженерных сооружений — буровых скважин различного назначения, организации контроля, требований к обоснованию и осуществлению захоронения.

Если первые нагнетательные и наблюдательные скважины экспериментального полигона захоронения жидких РАО Сибирского химического комбината (пл. 18а) в начале 60-х годов по своей конструкции и поверхностному оборудованию близки нефтяным, то в последующем были разработаны проекты существенно отличных сооружений, которые были построены и введены в эксплуатацию.

Сооружение полигонов захоронения осуществлялось по специальным проектам, разработке которых предшествовали предпроектные стадии подготовки, согласования и утверждения технико-экономического обоснования. Детальная разработка инженерных сооружений выполнялась на стадии рабочего проектирования.

Схема расположения нагнетательных и наблюдательных скважин, режимы захоронения отходов и периодичность контрольных наблюдений устанавливались на основании расчетов, моделирования (см. гл. 3) с использованием исходных данных, полученных при проведении геолого-разведочных работ и исследований.

Известны 2 существенно отличных типа системы захоронения: с разгрузкой и без разгрузки пласта-коллектора. Разгрузка или откачка чистой воды из специальных скважин применяется для снижения пластового давления в пласте-коллекторе, повышение которого обусловлено нагнетанием отходов. Разгрузка применяется, например, на полигоне захоронения жидких РАО Горно-химического комбината, где пласт-коллектор ограничен в плане, что приводит к развитию высоких пластовых давлений при нагнетании отходов. При эксплуатации полигона захоронения без разгрузки откачка чистой воды не проводится.

По схемам нагнетания отходов могут быть выделены круговая схема (полигон захоронения отходов Сибирского химического комбината, пл. 18), линейная схема (полигоны Горно-химического комбината) и промежуточная между ними «кустовая» схема (Сибирский химический комбинат, пл. 18а, опытно-промышленный полигон захоронения отходов НИИАР).

В настоящей главе на основе опыта создания и эксплуатации действующих полигонов захоронения и с учетом выполненных проработок приведены краткие сведения о наиболее важных, по нашему мнению, элементах систем захоронения

и проводимых мероприятиях, в том числе об инженерных сооружениях, методах контроля, ныне действующих и ранее применявшихся нормативных документах, составляющих правовую базу создания и эксплуатации систем захоронения РАО.

4.1. ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ЗАХОРОНЕНИЯ

Основу инженерного комплекса полигонов захоронения как жидких РАО, так и промстоков различных производств составляют подземные сооружения — буровые скважины различного назначения. От их конструкций, технического состояния и режимов эксплуатации в значительной степени зависит эффективность и безопасность захоронения. Эксплуатационные скважины полигонов захоронения отличаются от геолого-разведочных, нефтяных и водоснабженческих, особенно в части требований к их надежности, разобобщению горизонтов, конструкционных материалов и контроля технического состояния.

Поверхностные сооружения полигонов захоронения состоят из устьевого оборудования скважин («оголовков»), трубопроводов, насосных станций, систем электро- и теплоснабжения, КИПиА, административно-технических зданий, дорог. В состав поверхностного комплекса входят также передвижные агрегаты и оборудование, лаборатория, транспортные средства.

По своему назначению эксплуатационные буровые скважины подземного комплекса подразделяются на 3 основных типа: нагнетательные, контрольно-наблюдательные, разгрузочные. Кроме того, на полигонах захоронения имеются или могут сооружаться специальные скважины, в том числе водозаборные для технического водоснабжения из неглубокозалегающих горизонтов, инъекционные для ремонта или ликвидации эксплуатационных скважин.

Отличительной особенностью нагнетательных и части наблюдательных скважин полигонов захоронения жидких РАО является их многоколонная или «телескопическая» конструкция, в которой все обсадные колонны выводятся до устья, а верхние горизонты неглубокозалегающих пресных вод обсаживаются как минимум двумя колоннами. Внутренняя колонна, контактирующая с отходами, должна быть изготовлена из материалов коррозионностойких в среде отходов. Затрубное и межтрубное пространство обсадных колонн цементируется от «башмака» колонны до устья, что должно обеспечивать надежное разобобщение горизонтов. Качество всех работ

по сооружению скважин и состояние конструктивных элементов тщательно контролируются.

Конструкция нагнетательных скважин включает обсадные колонны, в том числе направление или кондуктор, техническую и эксплуатационную колонну, фильтровую колонну, лифтовую колонну. Схема конструкции скважин приведена на рис. 10.

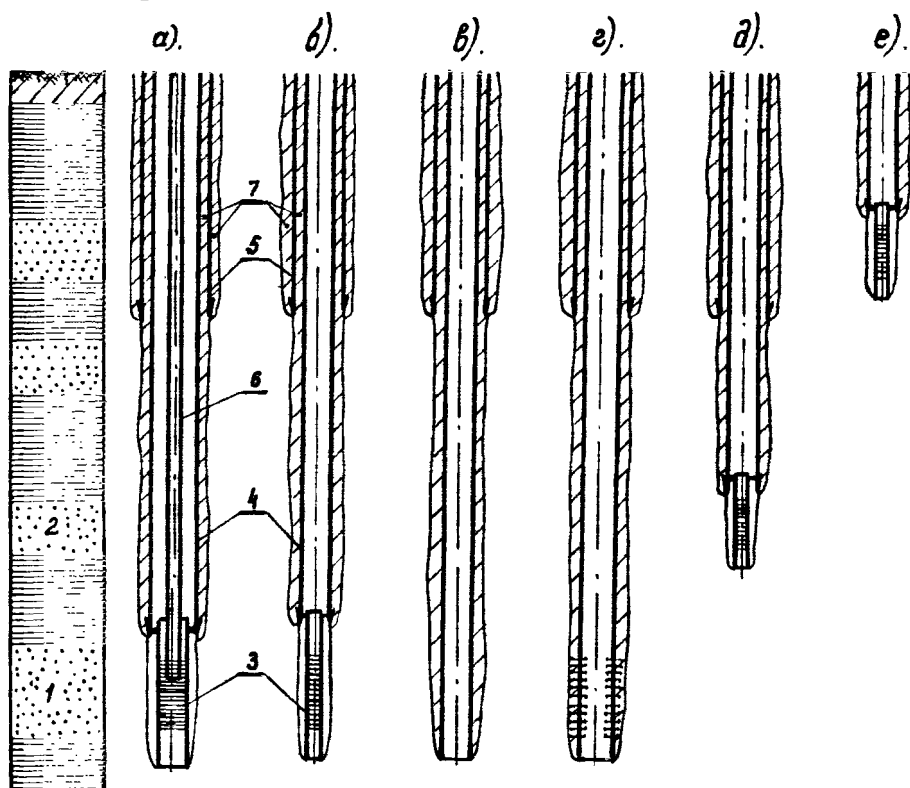


Рис. 10. Схема конструкций скважин полигонов захоронения жидких РАО
а — нагнетательная скважина; наблюдательные скважины: б — с фильтровой зоной; в — геофизическая (глухая); г — разведочная, переведенная в разряд наблюдательных; д, е — скважины на буферный и вышележащий горизонты. 1 — пласт-коллектор; 2 — буферный горизонт; 3, 4, 5, 6 — соответственно фильтровая, эксплуатационная, техническая и лифтовая колонны; 7 — цементное кольцо.

Направление предназначено для крепления верхних горизонтов рыхлых пород в процессе бурения в интервалах глубин до 20—25 м и имеет чисто технологическое назначение. В устойчивых породах направление не применяется.

Кондуктор выполняет роль направления, но обычно спускается на большую глубину, иногда до 100—150 м. В устойчивых породах кондуктор также может не применяться.

Диаметры кондуктора и направления обычно принимаются от 200 до 600 мм (8—22 дюйма).

Техническая колонна предназначена для крепления и изоляции верхних горизонтов разреза и обеспечения успешной проходки пласта-коллектора, спуска и надежного цементирования эксплуатационной колонны.

Глубина спуска технической колонны во многом определяется конкретными геолого-техническими условиями сооружения скважины, в частности, наличием неустойчивых интервалов разреза или зон поглощения промывочной жидкости и цементного раствора. Перекрытие этих интервалов технической колонной позволяет пройти без осложнений ствол под эксплуатационную колонну, ее спуск и крепление.

Эксплуатационная колонна—основная колонна скважины, внутреннее пространство которой контактирует с отходами. Глубина спуска эксплуатационной колонны—нижняя часть водоупорного горизонта, перекрывающего пласт-коллектор, который оборудуется фильтровой колонной. Если фильтровая зона скважины, через которую внутреннее ее пространство сообщается с пластом-коллектором, образуется перфорацией соответствующего интервала эксплуатационной колонны, последняя спускается ниже подошвы пласта-коллектора. Диаметры технической и эксплуатационной колонн обычно принимаются от 150 до 300 мм (6—12 дюймов).

Фильтровая колонна предназначена для крепления пласта-коллектора во вскрываемом интервале, подачи в него отходов, предупреждения выноса мелкодисперсного материала пласта-коллектора в скважину. В интервале пласта-коллектора колонна перфорируется обычно на поверхности, фильтрующим элементом служат проволоочная обмотка, керамика, пористые синтетические материалы.

Нижняя часть скважины в интервале горизонта, подстилающего пласт-коллектор, является отстойником, образуемым продолжением фильтровой или эксплуатационной колонны и предназначенным для приема мелкодисперсной твердой фазы, выносимой в скважину из пласта или содержащейся в отходах.

Лифтовые колонны служат для подачи отходов в фильтровую зону и уменьшения контакта отходов с внутренней поверхностью эксплуатационной колонны, применяются обычно при захоронении отходов повышенной агрессивности по отношению к материалу обсадных труб. Нижняя часть лифтовой колонны может быть оборудована пакером, изолирующим от отходов межтрубное пространство: лифтовая ко-

лонна — эксплуатационная колонна, которое при этом заполняется инертной жидкостью.

При проведении опытных работ нагнетательные скважины могут оборудоваться измерительной колонной, размещенной по оси скважины внутри или вместо лифтовой колонны. Внутреннее пространство измерительной колонны не сообщается со стволом нагнетательной скважины, колонна заполнена чистой водой, что позволяет проводить контрольные геофизические наблюдения непосредственно в нагнетательной скважине.

Техническое состояние скважины и его соответствие предъявляемым требованиям во многом определяются технологией сооружения, которая выбирается с учетом конкретных геолого-технических условий. Необходимой составной частью сооружения скважины является контроль технологических параметров проходки, искривления и сечения ствола скважины, спуска колонн и их крепления, герметичности труб и их сварных или резьбовых соединений, состояния цементного камня, характера вскрытия пласта-коллектора. С этой целью сооружение скважины сопровождается комплексом исследований и наблюдений, в том числе контролем динамических характеристик проходки, параметров бурового и цементного раствора и скоростью их прохождения в скважине, давления и расхода цементирования, комплексом геофизических исследований скважины (ГИС) как в открытом стволе (электрокаротаж, кавернометрия, инклинометрия), так и в закрытом (термометрия, радиоактивный каротаж, цементометрия с использованием акустических или радиометрических методов, расходометрия и др.).

Требования к техническому состоянию скважин, режимам проходки, крепления, исследования, освоения, опробования и приемки оформляются в виде технических условий, являющихся составной частью проектной документации.

Контрольно-наблюдательные скважины предназначены для проведения наблюдений за распространением отходов, сопутствующих процессов, состоянием геологической среды. Под наблюдательными скважинами обычно понимаются скважины, вскрывающие пласт-коллектор и в которых возможно появление компонентов отходов. Под контрольными понимаются скважины, используемые для наблюдений за состоянием выше- или нижележащих горизонтов, где отходы не ожидаются. Однако такое разделение носит условный характер и на практике к скважинам обоих типов применяется термин «наблюдательные».

Конструкция контрольно-наблюдательных скважин и технология сооружения в целом аналогичны нагнетательным, однако количество обсадных колонн и, соответственно, их

диаметры обычно меньше, чем для нагнетательных. Для скважин, расположенных вблизи нагнетательного контура и вскрывающих пласт-коллектор, также предусматривается оборудование интервалов неглубокозалегающих горизонтов подземных вод двумя колоннами. В удаленных и контрольных скважинах кондуктор или техническая колонна спускается на меньшую глубину. Исключения составляют скважины, являющиеся наблюдательными в начальный период эксплуатации полигона и в последующем используемые как нагнетательные (резервные нагнетательные). Их конструкции принимаются аналогичными нагнетательным.

Одним из видов наблюдательных скважин являются так называемые «глухие» скважины или геофизические. Внутреннее пространство скважин не сообщается с пластом-коллектором, скважины предназначены для проведения геофизических измерений без непосредственного контакта опускаемых приборов с отходами. Скважины подобного типа обычно располагаются вблизи нагнетательного контура полигона, где содержания радиоактивных нуклидов могут быть высокими.

Контрольные скважины, вскрывающие неглубокозалегающие горизонты пресных вод, часто называют санитарно-гидрогеологическими.

Конструкции, технология сооружения, исследования и предъявляемые требования к техническому состоянию скважин, так же как и для нагнетательных, определяются техническими условиями. В состав контрольно-наблюдательных скважин обычно включаются и ранее пробуренные разведочные скважины, но при условии их соответствия установленным требованиям.

Разгрузочные скважины предусматриваются при необходимости разгрузки пласта-коллектора, или, что то же, откачки из него чистой воды, осуществляемой при необходимости снижения пластового давления в коллекторе при нагнетании отходов. Поскольку в разгрузочных скважинах отходы не будут присутствовать, к их конструкциям применяются менее жесткие требования, чем к нагнетательным. Для водоотбора используются погружные электронасосы, но возможно применение эрлифта.

Конструкции водозаборных и инъекционных скважин определяются геолого-техническими условиями их сооружения и эксплуатации и принципиально не отличаются от таковых, используемых в других областях.

Узел сооружений по подготовке отходов к захоронению поверхностного комплекса является начальным на пути движения отходов в пласт-коллектор. В большинстве случаев

подготовка отходов осуществляется на территории основных производств или в цехах по переработке стоков, откуда они направляются на захоронение. Собственно на полигонах обычно имеются приемные емкости, в которых возможны накопление и отстой отходов.

К сооружениям для транспортировки отходов от узла подготовки относятся напорные трубопроводы низкого давления и насосные станции перекачки. Конструкция и оборудование этих сооружений зависят от уровня активности и состава отходов, режима подачи и суточного расхода. Для технологических отходов используются трубопроводы в коррозионностойком исполнении, размещаемые «труба в трубе» и укладываемые в лотках, облицованных коррозионностойкими материалами и пластиком. По трассе трубопроводов устанавливаются емкости сбора протечек с сигнализатором уровня и дренажем. Технические требования к подобным сооружениям приводятся в ведомственных нормативных документах по проектированию радиохимических предприятий.

Станция нагнетания отходов является одним из основных поверхностных сооружений полигона. Располагается на территории полигона вблизи контура нагнетания отходов.

Для нагнетания отходов применяются следующие типы насосов:

- для нетехнологических низкоактивных отходов используются центробежные (сальниковые) насосы с давлением нагнетания от 20—25 ати до 50—60 ати (многоступенчатые типа МС, АЯП, МД и др., питательные типа ПН, КВН и др.);

- для технологических отходов используются герметичные бессальниковые насосы типа БЭН и ЦНГ с давлением нагнетания от 10—12 до 25 ати.

Станции нагнетания (насосные станции) проектируются с учетом требований радиохимических производств по двух- или трехзонной схеме.

Напорные трубопроводы для подачи отходов к скважинам проектируются так же, как и трубопроводы передачи отходов на полигон в лотках, со сбором протечек, «труба в трубе» и т.д.

Оголовки скважин различных типов представляют собой отдельно стоящие полузаглубленные сооружения (павильоны), в которых размещается обвязка устья скважин, включающая в себя необходимую запорно-регулирующую арматуру и контрольно-измерительные приборы с местным и дистанционным выводом показаний. Павильоны отдельных типов нагнетательных скважин имеют размеры в плане 4×4 м, 6×6 м, 6×9 м. В павильонах предусматриваются автономные

системы отопления, приточно-вытяжной вентиляции с очисткой воздуха. Применяются два принципиально отличных типа оголовков нагнетательных скважин при размещении павильона запорно-регулирующей аппаратуры: непосредственно над устьем скважины и на удалении 5—10 м от него. Оголовок второго типа позволяет устанавливать над скважиной, оборудование, например, вышки агрегата для ремонта скважин без демонтажа павильона. Конструкции оголовков скважин также зависят от уровня активности отходов.

Устьевая обвязка нагнетательной скважины должна обеспечивать подачу отходов в скважину, регулирование и контроль давления и расхода нагнетания, подключение дополнительного насосного оборудования или цементирующего агрегата при проведении работ по восстановлению приемистости скважины или ее консервации, сбор протечек из арматуры и направление их в приемную емкость и затем на захоронение. Применяемая арматура рассчитывается на давление, как минимум в 2 раза превышающее установленное давление нагнетания.

Устьевая обвязка контрольно-наблюдательных скважин значительно проще нагнетательных. Для наблюдательных скважин, расположенных вблизи нагнетательного контура, в скважинной жидкости которых будут присутствовать компоненты отходов в относительно высоких концентрациях, а устья будут находиться под давлением, предусматриваются прободоотборные трубки малого диаметра, спускаемые до фильтровой зоны и герметизируемые в верхней части, что позволяет проводить прободоотбор и определять давление при минимальном загрязнении поверхностного оборудования.

Для наблюдательных скважин, удаленных от нагнетательных, «глухих» скважин и контрольных скважин, вскрывающих выпелечающие горизонты, поверхностное оборудование еще больше упрощается.

В качестве павильонов и оголовков разгрузочных скважин обычно применяются типовые оголовки для водозаборных скважин. Откачиваемая при разгрузке пласта-коллектора чистая вода сбрасывается в гидросеть или используется для технического водоснабжения. Если вода минерализована, она может направляться для удаления в поглощающие горизонты, залегающие выше или ниже пласта-коллектора и также содержащие минерализованные воды.

В состав поверхностного комплекса полигонов захоронения входят также системы электро- и теплоснабжения, административно-технические здания, лабораторное оборудование и передвижные агрегаты, транспорт, связь и т.д.

4.2. КОНТРОЛЬ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ

В соответствии с одним из концептуальных положений глубинное захоронение жидких РАО должно сопровождаться контролем за составами и объемами удаляемых отходов, распределением отходов в геологической среде и связанных с этим процессами. Результаты контроля должны использоваться для проверки ранее выполненных прогнозов и подтверждения безопасности.

В составе первого полигона захоронения жидких РАО Сибирского химического комбината (экспериментальный полигон) были предусмотрены специальные наблюдательные скважины, проведение контрольных наблюдений и измерений. Применявшиеся методы были полностью заимствованы из практики геолого-разведочных работ и нефтедобывающей промышленности и включали гидродинамические наблюдения, отбор проб пластовых жидкостей из скважин для анализов различных видов, геофизические исследования скважин — гамма-каротаж и термометрию.

К настоящему времени применяемые системы контроля захоронения жидких РАО выполняют ряд функций мониторинга недр и продолжают развиваться.

Контроль глубинного захоронения жидких РАО имеет ряд особенностей. Значительный объем геологической среды, который может находиться под влиянием захоронения, требует больших количеств точек контроля. Жидкая форма отходов обуславливает практически непрекращающееся изменение их положения, вероятность вертикального перераспределения в пределах пласта-коллектора и, соответственно, необходимость значительных объемов контрольных наблюдений. В связи с потенциальной опасностью отходов необходимо регулярно получать информацию о положении и состоянии отходов для представления ее контролирующим органам и общественности.

Первой задачей контроля глубинного захоронения жидких РАО является установление фактического распределения компонентов отходов в пластах-коллекторах и в геологической среде в целом путем прямых определений компонентов отходов в пластовой жидкости и в породах пласта-коллектора, а также на основании косвенных признаков — изменение пластового давления (пьезометрической поверхности подземных вод), температуры, электрического сопротивления воды в скважине.

Результаты контрольных наблюдений сопоставляются с данными прогнозов и на этом основании формулируются

выводы о характере протекания процессов захоронения и необходимости проведения мероприятий по оптимизации режимов эксплуатации полигонов и, в крайнем случае, противоаварийных мероприятий.

Не менее важной задачей является контроль технического состояния скважин, от которого во многом зависит эффективность эксплуатации полигона захоронения, надежность изоляции пласта-коллектора, содержащего отходы, от вышележащих горизонтов и поверхности. Контроль состояния скважин осуществляется как путем определения параметров их работы, так и при непосредственном их обследовании со спуском в скважины глубинных приборов. Результаты контроля технического состояния скважин используются для планирования и проведения мероприятий планово-предупредительного ремонта, уточнения эксплуатационного ресурса скважин. Проводится также контроль технического состояния поверхностных сооружений.

Обязательной составной частью контроля захоронения является определение параметров нагнетания — давления и расхода, состава нагнетаемых отходов и особенно содержания в них отдельных компонентов, от которых зависит эффективность и безопасность захоронения. Определяемые параметры и характеристики должны соответствовать регламентным требованиям.

Особое место в системе контроля занимает обнаружение ранних признаков развития осложнений и аварийных ситуаций, что дает возможность предупредить их реализацию проведением соответствующих мероприятий.

Проводится также контроль за возможным проявлением весьма маловероятных событий — возникновением источников сейсмических колебаний, связанных с захоронением, изменением положения дневной поверхности. В табл. 4.1 приведена общая характеристика объектов, задач и методов контроля захоронения жидких РАО.

Основу контроля захоронения составляет сеть специально предусматриваемых контрольно-наблюдательных скважин, приборы и оборудование, транспортные средства, штаты специалистов.

Количество и расположение скважин выбирается на стадии проектирования на основании прогнозирования исходя из задачи регулярного получения представительной информации и положении отходов в недрах, раннего выявления предпосылок развития осложнений и аварийных ситуаций. Сеть скважин сгущается на участке нагнетательного контура для получения максимальной информации о процессах на начальных этапах

Объекты, задачи и методы контроля глубинного захоронения жидких РАО

№№ п/п	Объекты контроля	Задачи контроля	Методы контроля	Определяемые параметры и характеристики	Критерии оценки данных контроля
1	2	3	4	5	6
1.	Геологическая среда (недра)	Установление распределения РАО, характера протекания сопутствующих процессов	Радиохимическое опробование Гидродинамический метод Геофизический метод (в т. ч. радиоактивный, термо- и электрокаротаж, сейсмические наблюдения)	Содержания компонентов РАО в ПВ Положение пьезометрической поверхности ПВ Характеристики геофизических полей в скважинах и на поверхности	Соответствие распределения РАО прогнозам, отсутствие отходов в выше лежащих горизонтах и за пределами отвода недр
2.	Техническое состояние скважин	Определение параметров работы, состояния конструктивных элементов, контроль изоляции пласта-коллектора от выше лежащих горизонтов	Радиохимическое опробование Гидродинамический метод Геофизический метод (в т. ч. акустический, радиоактивный, термокаротаж)	Содержание РАО в ПВ выше лежащих горизонтов в районе скважины Положение пьезометрической поверхности ПВ выше лежащих горизонтов в районе скважины Характеристики геофизических полей в интервалах выше пласта-коллектора	Характеристики выше лежащих горизонтов не отличаются от фоновых, уровни ПВ выше лежащих горизонтов не отличаются от естественных Параметры не отличаются от фоновых, акустические или плотностные характеристики цементного камня соответствуют требуемым

Режимы нагнетания и состава РАО	Проверка выполнения требований регламента, состояние прифильтровой зоны скважины	Прямые измерения хим. и р. х. анализ проб отходов	Расход и давление нагнетания, содержания лимитирующих компонентов в РАО	Проектные и регламентные значения
---------------------------------	--	---	---	-----------------------------------

Примечание: сокращения, используемые в таблице:

ПВ—подземные воды;

хим. и р. х. анализ—химический и радиохимический анализ.

эксплуатации и при необходимости своевременной корректировки режимов захоронения. Сеть скважин сгущается также на участках с осложненным геологическим строением, например ступене- или грабенообразных структур в фундаменте, опесчанивания водоупоров и т. д. В непосредственной близости от нагнетательных скважин располагаются «глухие» наблюдательные скважины для проведения геофизических измерений и контрольные скважины на неглубокозалегающие горизонты.

Общее количество контрольно-наблюдательных скважин довольно велико и составляет:

для 2 полигонов СХК — 259,

для 2 полигонов ГХК — 70.

для опытно-промышленного полигона НИИАР — 32

В пределах и за пределами полигона имеются также пункты и системы поверхностного контроля, в которых выполняются стандартные наблюдения за воздухом, водой, почвой, растительностью.

При проведении контрольных наблюдений используются стандартные приборы и оборудование, применяемые на радиохимических предприятиях, при геолого-разведочных работах и нефтедобыче: манометры и расходомеры, пробоотборники, уровнемеры, геофизические приборы, каротажные подъемники и лаборатории. Была также разработана специальная аппаратура применительно к условиям захоронения:

— аппаратный комплекс для исследования скважин СНРК «Кедр», позволяющий осуществлять измерения бета- и гамма-излучений непосредственно в скважинах, в том числе в условиях высоких температур и при максимальных экспозиционных дозах гамма-излучения;

— 12 канальный комплекс сейсмического контроля и ряд других.

Служба контроля захоронения входит в состав эксплуатационной службы полигона в целом, являющейся цехом или отделением цеха объекта по переработке отходов предприятия.

В скважинах за пределами полигона и в некоторых полигонных скважинах наблюдения выполняются также службой охраны окружающей природной среды.

Контроль глубинного захоронения жидких РАО может быть разделен на следующие виды по контролируемым объектам:

— контроль нагнетания отходов, в том числе определение объемов и составов удаляемых отходов, суммарных количеств удаленных веществ и радиоактивных нуклидов, контроль

параметров нагнетания и режимов работы нагнетательных скважин;

- контроль состояния недр, который включает наблюдения за распределением компонентов отходов в пласте и протеканием связанных с этим процессов, в том числе напорным режимом пластов-коллекторов и вышележащих горизонтов и их температурой, характеристиками радиоактивных излучений, составом пластовых жидкостей, сейсмическим режимом;
- контроль состояния инженерных сооружений и прежде всего скважин, поверхностных сооружений.

По месту проведения контрольные наблюдения могут быть подразделены на технологический контроль, выполняемый непосредственно на полигоне захоронения для определения положения отходов, технического состояния скважин, режимов захоронения, и контроль окружающей геологической среды.

Объем и состав технологического контроля различаются в свою очередь от места проведения в пределах полигона. Наибольший объем контрольных наблюдений выполняется вблизи контура отходов в пласте-коллекторе, на участках наибольшего разогрева пород и т. д. После прохождения фронта отходов через наблюдательную скважину объем контроля уменьшается.

Контроль окружающей природной среды состоит из наблюдений в скважинах за пределами полигона захоронения и в скважинах, вскрывающих вышележащие горизонты подземных вод в пределах полигона. В районах радиохимических предприятий имеются и другие объекты, являющиеся действующими или потенциальными источниками загрязнения геологической среды (бассейны-накопители РАО, могильники твердых отходов, трубопроводы и т. д.), а также потребители подземных вод. Ввиду этого часто создается Единая система контроля недр (ЕСКН), задачами которой является обнаружение загрязнения подземных вод, разграничение областей влияния различных источников, обоснование мероприятий по прекращению загрязнений, оптимизация водопользования. В состав ЕСКН входят также и контрольные скважины полигона захоронения, кроме наблюдательных скважин технологического контроля. По административной линии ЕСКН подчиняется подразделениям предприятия, ответственным за контроль состояния окружающей природной среды, что повышает объективность получаемых данных.

Объем и методы контроля различаются в зависимости от этапа эксплуатации полигона захоронения. На начальном этапе объем наблюдений максимален, поскольку необходимо уточнить модели захоронения и откорректировать режимы

эксплуатации, подтвердить безопасность захоронения перед контролирующими органами. В последующем объем контрольных наблюдений может быть сокращен. На завершающем этапе эксплуатации полигона объем контрольных наблюдений опять увеличивается, что необходимо для получения исходных данных для разработки проекта консервации.

Как следует из вышесказанного, центральное место в контроле глубинного захоронения занимает контроль состояния недр и технического состояния скважин.

В их составе выполняются следующие виды исследований и определений.

Гидрогеохимические и радиохимические исследования — отбор проб подземных вод и фильтрата отходов из скважин, определение их состава, содержаний компонентов отходов. Отбор проб осуществляется с использованием специальных пробоотборников и оборудования, позволяющих получить представительные данные.

Гидродинамические наблюдения — определение положения пьезометрической поверхности подземных вод пласта-коллектора и вышележащих горизонтов (измерение уровней или давлений на оголовках скважин). Благодаря более быстрому распространению гидравлического возмущения в водоносных горизонтах, чем нагнетаемых растворов, гидродинамические наблюдения дают возможность определить общую тенденцию распространения отходов задолго до их появления в наблюдательной скважине, контролировать изолированность пласта-коллектора от вышележащих горизонтов. Для определения уровней и давлений используется стандартная аппаратура.

Геофизические наблюдения — измерение в скважинах физических полей, обусловленных захоронением отходов. Измерение радиоактивных излучений — гамма-каротаж позволяет устанавливать распределение гамма-излучающих радиоактивных нуклидов непосредственно в породах за стенкой скважины при перемещении глубинного прибора по оси скважины. Ценность этой информации — получение данных о вертикальной фильтрационной неоднородности пласта-коллектора, контроль состояния водоупорных горизонтов. Бета-каротаж позволяет определять также непрерывно по разрезу активность жидкости в скважине без подъема проб на поверхность. Термометрия (или термо-каротаж) позволяет контролировать изменение температуры из-за радиогенного тепловыделения отходов и их возможное вертикальное перераспределение. Резистивиметрия позволяет определить солесодержание жидкости в скважине, расходометрия — профиль поглощения жидкости по разрезу пласта-коллектора. Для геофизических

исследований используется стандартная и специально разработанная аппаратура и оборудование. Периодичность проведения контрольных наблюдений устанавливается на основе прогнозных расчетов и опыта контроля исходя из задачи получения данных с задаваемой точностью.

На рис. 11 приведена схема контроля и примеры получаемых результатов.

На основании получаемых данных измерений строятся графические материалы, отражающие состояние геологической среды: схемы изопьез, изолиний активности и содержаний компонентов РАО в пластовой жидкости и породах, температур, геолого-гидрогеологические разрезы с нанесением данных контроля и т.д. Эти материалы являются основой для уточнения параметров моделей путем решения обратных задач, для корректировки и оптимизации режимов эксплуатации.

4.3. НОРМАТИВНО-ПРАВОВАЯ БАЗА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

Глубинное захоронение жидких РАО, представляющих большую потенциальную опасность, является весьма ответственным мероприятием, связанным со значительными экономическими затратами, вовлечением природных ресурсов и участков недр. Такой вид деятельности подлежит регулированию со стороны государства, осуществляемого на основе специально создаваемых документов и контроля за выполнением требований этих документов.

Как показывает опыт государственного регулирования глубинного захоронения жидких РАО с 1955 г., нормативно-правовая документация в этой области может быть условно подразделена на 3 основные группы.

К первой группе относятся законодательные акты или подобные им документы, носящие характер законов. Эти документы содержат основополагающие требования к защите человека и охране окружающей природной среды, основные принципы деятельности по захоронению РАО. Эти документы имеют долговременный характер.

К документам второй группы относятся различные нормы, правила, положения, технические условия, в которых конкретизируются требования законодательных актов, приводятся конкретные значения различных параметров и характеристик, способы их достижения, технологии и т. д. Документы этой группы могут корректироваться и дополняться в зависимости

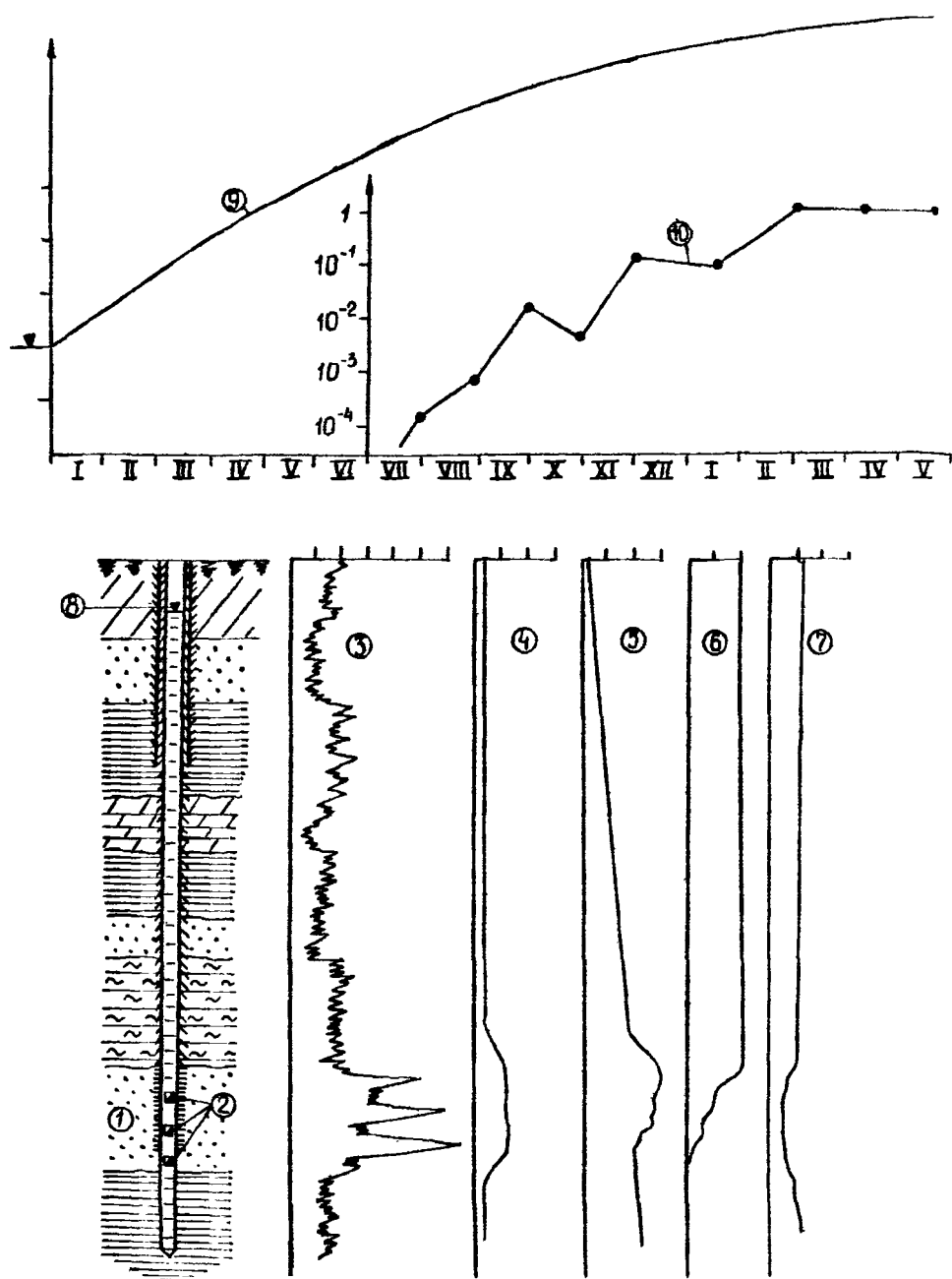


Рис. 11. Примеры данных контроля захоронения жидких РАО

1—пласт-коллектор, 2—интервалы отбора проб жидкости, 3—7—результаты соответственно гамма- и бетта-каротажа, термометрии, расходомерии, резистивиметрии, 8—уровень подземных вод в скважине, 9—зависимость изменения положения уровня ПВ во времени, 10—зависимость содержаний компонентов отходов в скважине.

от получаемых результатов научных проработок, экономических задач, практического опыта.

К документам третьей группы относятся технологические нормы и регламенты, методики, разрабатываемые для каждого производства или предприятия, видов работ и исследований.

Нормативно-правовые документы 3 указанных групп отличаются порядком и уровнем подготовки, согласования и утверждения, вводом в действие. Если разработка и принятие законодательных документов являются прерогативой высших органов власти, то нормативные документы разрабатываются и утверждаются главным образом ведомствами с привлечением, а иногда под руководством заинтересованных структур, в том числе Академии Наук, Национальной Комиссии по радиационной безопасности и др. Нормативные документы производственного характера разрабатываются предприятиями или по их заданию институтами, обычно утверждаются подразделениями ведомств.

Разработка и утверждение нормативно-правовой базы захоронения РАО требовали определенного времени и соответствующих научных проработок. Ввиду необходимости безотлагательного решения проблемы захоронения РАО в конце 50-х — начале 60-х годов роль законодательных документов выполняли постановления и распоряжения Правительства, принимавшиеся на основе обсуждения предварительных научных проработок и их рассмотрения на научно-технических советах Министерств среднего машиностроения, здравоохранения, геологии и с участием экспертов Академии Наук. Первое распоряжение по вопросам глубинного захоронения жидких РАО было принято 13.09.58 (№ 3019рс) и подписано премьер-министром правительства А. Н. Косыгиным. В постановлении рассматривались основные задачи и требования к проведению работ, основные принципы организации деятельности, назначались ответственные ведомства.

В связи с важностью вопросов охраны окружающей среды, в том числе при создании систем захоронения жидких РАО, в 1959 г. было принято соответствующее постановление Правительства № 1036 «Об усилении государственного контроля за использованием подземных вод и о мероприятиях по их охране» и разработано «Положение о порядке использования и охране подземных вод на территории СССР (1960 г.)». Все работы по созданию систем захоронения проводились с учетом «Положения...».

В пп. 19—21 «Положения...» говорится: «...запрещается сброс в поглощающие скважины и колодцы сточных вод, содержащих радиоактивные вещества. В исключительных случаях после проведения специальных исследований это может быть разрешено Министерством здравоохранения СССР, совместно с республиканскими организациями геологии и охраны недр, после согласования вопроса последними с Министерством геологии и охраны недр СССР».

Организация и содержание работ по проблеме полностью соответствовали приведенным выше требованиям. Так, геолого-разведочные работы с целью обоснования и выбора геологической структуры и пласта-коллектора для надежного и безопасного захоронения жидких РАО выполнялись специализированной организацией Мингео СССР—ПГО «Гидроспецгеология», официальные отчеты которой являлись основными исходными данными при разработке проектной документации по полигонам. В работах на местах участвовали специалисты территориальных геологических управлений Главгеологии РСФСР. Метод глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов был принципиально одобрен на Коллегии Минздрава СССР (1960 г.). В разработках санитарно-гигиенических аспектов проблемы активно участвовали специалисты 3-го Медицинского управления и Института биофизики Минздрава СССР.

На базе накопленного опыта проведения геолого-разведочных работ и исследований по проблеме, а также на основе научного обобщения большого фактического материала по геологическому строению, тектонике, гидрогеологии, полезным ископаемым специалистами ПГО «Гидроспецгеология» Мингео в 1965—70 гг. под рук. акад. А. В. Сидоренко была подготовлена и издана «Прогнозная карта гидрогеологических условий захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные комплексы» на территории СССР масштаба 1:2.500.000. По представлению Мингео карта была рассмотрена на Коллегии Госкомитета СССР по науке и технике. В своем Постановлении от 01.04.1970 г. № 99 ГКНТ СССР одобрил проделанную работу и рекомендовал Госплану, Министерством и ведомствам учитывать возможности глубинного захоронения не поддающихся очистке сточных вод при планировании строительства новых и реконструкции действующих предприятий на основе использования данных «Прогнозной карты...».

Научный Совет по инженерной геологии и грунтоведению и секция литосферы при научно-техническом Совете по проб-

лемам биосферы Академии Наук в своих решениях отметили, что «Прогнозная карта...» дает научную оценку всей территории СССР с точки зрения возможности закачки промышленных стоков в недра Земли.

Деятельность по захоронению жидких РАО нашла отражение в Основных санитарных правилах работы с радиоактивными веществами и источниками радиоактивных излучений. В действующих в настоящее время ОСП-72/87 предусмотрены условия осуществления захоронения жидких РАО (п. 9.8).

В последующем был разработан и принят ряд законодательных и нормативных документов, в которых освещены вопросы глубинного захоронения промышленных отходов и сточных вод, в том числе:

- Основы Водного законодательства, 1970 г. (статьи 14, 15, 31);

- Водный кодекс РСФСР, 1977 г. (статьи 74, 75, 76);

- Основы законодательства Союза ССР о недрах, 1975 г. (статьи 9, 12, 14, 27 и др.);

- Кодекс РСФСР о недрах, 1976 г. (статьи 37, 38, 44, 64, 66 и др.);

- Инструкция о порядке согласования и выдачи разрешений на спецводопользование, 1978 г. (п. 3.7.8);

- Положение об охране подземных вод, 1984 г. (ст. 47 — 51);

- Инструкция о порядке представления недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, 1984 г.;

- Временные технические указания по проектированию поверхностных сооружений и коммуникаций полигонов глубинного захоронения жидких отходов, 1979 г.

В 1979 г. на базе обобщения большого опыта проведения геолого-разведочных работ, проектирования, строительства и эксплуатации полигонов глубинного захоронения жидких РАО институтом ВНИПИпромтехнологии, институтом Биофизики и 3-м Главным медицинским управлением Минздрава были разработаны «Временные санитарные правила и технические условия устройства и эксплуатации полигонов подземного захоронения жидких радиоактивных отходов» (ВСП и ТУ ПЗ-79), действующие до настоящего времени (5).

ВСП и ТУ ПЗ-79 на протяжении почти 14 лет являются основным и единственным нормативным документом в стране по созданию и эксплуатации полигонов глубинного захоронения потенциально опасных и особо токсичных жидких промышленных отходов производства. Они согласованы Мингео, Госгортехнадзором, Госкомгидрометом и утверждены Минздравом и Госкомитетом по атомной энергии. ВСП и ТУ

ПЗ-79 использованы для проектирования многих полигонов глубинного захоронения в других отраслях промышленности, в том числе полигонов комбинатов «Оргстекло» и «Корунд» в г. Дзержинске Нижегородской обл., полигона ПХЗ пгт Первомайский Харьковской обл., полигона Кирово-Чепецкого химкомбината Кировской обл., полигона Чепецкого механического з-да Удмуртской Республики и др. Все эти полигоны являются основными сооружениями предприятий по безопасному и надежному удалению и локализации отходов, для которых не имеется апробированных в промышленных условиях других методов очистки и переработки, возможность, безопасность и экономическая целесообразность строительства полигонов были доказаны путем проведения комплексных исследований и технико-экономических обоснований.

Принятый Верховным Советом РФ и опубликованный 3 марта 1992 г. новый Закон «Об охране окружающей природной среды» содержит ряд новых требований и ограничений по вопросам сброса отходов и канализационных стоков (ст. 54.3), захоронения потенциально опасных и особо токсичных отходов (ст. ст. 54.4 и 54.6, ст. 45.3), проведения государственной экологической экспертизы (ст. 36.1, 36.2).

В соответствии со ст. 54 п. 3 запрещается сброс отходов и сточных вод в водоносные горизонты, используемые для других целей («общего пользования»). В соответствии с «Комментариями к Закону об охране окружающей природной среды», выпущенными издательством Верховного Совета в 1992 г., приведенная формулировка не исключает использование коллекторских горизонтов для захоронения особотоксичных отходов [59].

В законе РФ «О недрах» от 21 февраля 1992 г. (ст. 23.8), а также в «Положении о порядке лицензирования пользования недрами» от 15.06.92 (разделы 13 и 14) и в «Инструкции по применению Положения о порядке лицензирования пользования недрами» более четко и определенно отражены вопросы сброса сточных вод в недра, захоронения токсичных и особо опасных промстоков, условия проведения работ, лицензирования и реализации технологии глубинного захоронения.

С учетом новых законодательных актов в настоящее время (в дополнение к ранее полученным по каждому полигону Разрешения на спецводопользование, Акта горного отвода) готовятся и оформляются документы на получение Лицензий на право пользования недрами для захоронения жидких радиоактивных отходов (т.е. для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых).

Использование недр для захоронения отходов является платным. Объемы платы устанавливаются «Положением о порядке и условиях взимания платежей за право пользования недрами, акваторией и участками морского дна» (п. 19), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 28.10.92 г., №. 828.

На момент написания данной книги в стадии разработки находился ряд законодательных актов и нормативных документов, в которых также рассматривались вопросы захоронения РАО.

Таким образом, создание и эксплуатация систем захоронения жидких РАО имели соответствующее нормативно-правовое обеспечение, которое с учетом новых принятых документов не утратило значение и в настоящее время.

Одним из дебатированных вопросов, возникающими при обсуждении глубинного захоронения РАО, является время гарантированной изоляции отходов в недрах. Требования о «вечной» изоляции РАО является практически невыполнимым, так как в конечном итоге преобразованиям подвергнутся все геологические формации. Весьма затруднительно выполнить прогнозы развития общества на тысячелетние периоды, степени вовлечения в сферу деятельности людей геологических формаций, которые могут содержать РАО. В связи с этим время максимального прогнозирования состояния РАО в геологических формациях ограничивается. Так, в Акте по политике захоронения отходов атомной энергетики 1982 г., опубликованном в Федеральном реестре США, т. 48, № 26, с. 5670—5682, 7.02. 1983 г., отмечается, что необходимо иметь прогнозы параметров фильтрации подземных вод и массопереноса на 1000 и 10 000 лет вперед [65].

5. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Существующие системы (полигоны) захоронения жидких РАО России являются уникальными объектами как по количествам удаленных радиоактивных веществ в составе отходов, так и значимости решаемых задач по защите людей от радио-

активных излучений, масштабам воздействия на геологическую среду.

Практический опыт создания и эксплуатации полигонов глубинного захоронения жидких РАО и результаты выполненных исследований и наблюдений могут быть использованы для уточнения и корректировки ряда теоретических построений и моделей, разработанных для решения задач охраны окружающей среды, прогнозирования загрязнения подземных вод, захоронения токсичных отходов. Несмотря на совершенство теоретических проработок, для многих из них характерен один общий недостаток — отсутствие или очень ограниченная их практическая проверка.

В настоящей главе рассматриваются полигоны глубинного захоронения жидких РАО Сибирского химического комбината, Горно-химического комбината, Научно-исследовательского института атомных реакторов по опубликованным материалам и полученным в последнее время [60, 61].

Последовательность изложения материалов главы преследует цели освещения прежде всего тех условий и особенностей захоронения, которые определяют его безопасность, а также рассмотрения результатов, полученных при многолетних исследованиях эксплуатации полигонов. Вначале рассматриваются геологические условия каждого полигона, поскольку именно они занимают главенствующее значение среди факторов безопасности, особенности решения конкретных задач при геологической разведке, исследованиях и проектировании.

Определенное внимание уделено принятым схемам и режимам эксплуатации полигонов, методикам контрольных наблюдений. Приведены наиболее интересные результаты, их сопоставление с прогнозами, выполненными на различных этапах захоронения. Обращено внимание на те трудности, которые возникали при создании полигонов и захоронении отходов и существуют в настоящее время.

5.1. ПОЛИГОНЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО СИБИРСКОГО ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Геологическая характеристика

Геологические условия полигонов захоронения изучались путем проведения специальных геолого-разведочных работ и были уточнены при бурении и исследовании эксплуатационных скважин.

Район СХК расположен в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и Саяно-Алтайской складчатой области, где скальные породы палеозойского фундамента погружаются под толщу песчано-глинистых мезо-кайнозойских пород, содержащих песчаные слои, обладающие коллекторскими свойствами, и слои глинистых слабопроницаемых пород — относительных водоупоров.

Скальные породы выходят на поверхность в 25—30 км к югу от района полигонов захоронения на окраине г. Томска. В западном, северо-западном и северном направлениях они погружаются и залегают на глубинах 350—450 м в районе полигонов (рис. 12). Палеозойские образования фундамента сложены, в основном, сланцами и в верхней части — глинистой корой выветривания, на которой залегает толща песчано-глинистых пород.

На рис. 13 приведена стратиграфическая колонка мезо-кайнозойских отложений с указанием возрастных индексов и условных обозначений горизонтов.

По совокупности геологических признаков в песчано-глинистой толще выделяется комплекс меловых отложений, представленных песчаными горизонтами I, II, III, IV и глинистыми A, B, C, D, комплекс палеогеновых и четвертичных отложений в составе песчаных горизонтов IVa, V, IV и глинистых E, F, G. Граница между меловыми и палеогеновыми отложениями соответствует горизонту E, разделяющему IV и IVa горизонты.

В качестве пластов-коллекторов используются II и III песчаные горизонты, подстилаемые слабопроницаемыми глинистыми горизонтами B, A, глинами коры выветривания палеозоя и перекрываемые повсеместно развитым горизонтом слабопроницаемых образований D. Нижезалегающий песчаный горизонт I, разделяющий горизонты B и A, развит не повсеместно. II и III горизонты разделяются глинистым горизонтом C, который опесчанивается и характеризуется увеличением проницаемости в юго-восточной части полигона пл. 18. Выше горизонта D залегает IV горизонт, являющийся буферным по отношению к эксплуатируемым II, III и перекрываемый слабопроницаемым горизонтом E.

Коллекторские II и III горизонты сложены среднезернистыми песками различной степени глинистости. Наиболее характерными минералами являются кварц (70—80%), полевые шпаты типа ортоклаза, микроклина или плагиоклаза, минералы группы слюд и гидрослюд, а также глинистые минералы каолинитовой и монтмориллонитовой групп. Встречаются карбонатные минералы и органическое вещество.

Слабопроницаемые горизонты представлены различными глинистыми породами: пестроцветными, плотными, «жирными» глинами, местами песчано-алевритистыми, сидеритизированными. Трещиноватость встречается местами и в целом не характерна.

Гидрогеологическая стратификация отличается от приведенной возрастной, что имеет значение для обоснования безопасности захоронения. В разрезе выделяются два водоносных комплекса: нижний, включающий I, II и III меловые горизонты, и верхний в составе IV мелового, IVa, V и VI палеогеновых и четвертичных горизонтов. Комплексы разделены горизонтом глинистых слабопроницаемых отложений *D*, обладающих водоупорными свойствами. Разделение комплексов осуществлено по ряду признаков: различие напоров, гидрогеохимические показатели, геолого-геофизическая корреляция, поля концентраций гелия и т. д. Изолирующие свойства горизонта *D* установлены как на основании анализа естественных полей напоров, так и результатов длительных опытных откачек и нагнетаний, контрольных наблюдений при многолетней эксплуатации полигонов.

Отмечено существенное различие верхней и нижней частей разреза и по фильтрационным свойствам. Так, если суммарная водопроницаемость (гидропроницаемость) IV, V и VI горизонтов характеризуется значениями до $1600 \text{ м}^2/\text{сут}$, то для I, II, III горизонтов эта величина составляет $60-80 \text{ м}^2/\text{сут}$. Водопроницаемость IV горизонта занимает среднее значение и характеризуется величинами $80-200 \text{ м}^2/\text{сут}$. Высокой водопроницаемостью верхних горизонтов обусловлено их широкое использование для водоснабжения за пределами горного отвода и санитарно-защитных зон полигонов захоронения. Ввиду низкой водообильности нижний водоносный комплекс для этих целей неперспективен.

Горизонты нижнего водоносного комплекса содержат напорные воды гидрокарбонатно-кальциевого состава с минерализацией $0,3 \text{ г/л}$. Пьезометрические напоры над кровлей пластов достигают $300-320 \text{ м}$ для II горизонта и $250-280 \text{ м}$ для III горизонта. Геофильтрационные параметры коллекторских горизонтов, определенные по данным опытных откачек и нагнетаний, приведены в табл. 5.1.

По данным геолого-разведочных работ и опробования скважин, образования палеозоя характеризуются низкой проницаемостью и не содержат коллекторов, в связи с чем они детально не изучались.

Район СХК расположен в юго-восточной части Обского артезианского бассейна. Область разгрузки вод нижнего водо-

носового комплекса приурочена к району слияния рек Обь и Томь. Естественное движение вод нижнего водоносного комплекса имеет южное и юго-западное направление и характеризуется скоростями движения 3—5 м/год. Естественный уклон пьезометрической поверхности подземных вод 0,0009.

Таблица 5.1

**Геофильтрационные и емкостные параметры пластов-коллекторов
в горизонта D в районе пл 18, 18а**

№№ п/п	Параметры	Един. измер	пл. 18а	пл. 18	
			II гор.	II гор.	III гор.
1	2	3	4	5	6
1.	Глубина залегания	м	314—341	349—386	270—320
2.	Мощность	м	30—50	30—50	50—90
3.	Эффективная мощность	м	13—30	13—24	22—75
4.	Общая пористость	—	0,35	0,35	0,4
	Эффективная пористость	—	0,05—0,14	0,1	0,15
5.	Водопроводимость	м ² /сут	17—24	24	34
6.	Коэффициент фильтрации	м/сут	0,7—0,9	0,5—3,0	0,2—2,2
7.	Коэффициент пьезопроводности	м ² /сут	$1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
8.	Напор над кровлей	м	300—320	325—350	250—280
9.	Мощность горизонта D	м	28—29	58—62	58—62
10.	Коэффициент фильтрации горизонта D	м/сут	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$

Важным фактором безопасности захоронения являются условия залегания и характеристики слабопроницаемых горизонтов, перекрывающих и подстилающих коллекторские, в которые осуществляется захоронение. Использование для захоронения отходов нижнего водоносного комплекса, а для водоснабжения — верхних водоносных горизонтов придает этому вопросу определенную остроту, хотя водозаборы расположены за пределами санитарно-защитных зон и горного отвода недр.

Для выделенных в геологическом разрезе района СХК слабопроницаемых горизонтов глинистых пород в целом

характерны невыдержанность по составу и наличие песчаных прослоев, уменьшение мощности и выклинивание в юго-восточном направлении, что обусловлено сокращением разреза в связи с уменьшением глубины залегания фундамента. Однако участки возможной взаимосвязи горизонтов находятся на значительном удалении от полигонов (10—12 км) вне области влияния захоронения отходов.

Участок опесчанивания горизонта *C* у юго-восточной границы полигона захоронения пл. 18 (фильтрационное «окно»), обнаруженное при проведении геолого-разведочных работ, практически не влияет на условия локализации отходов, т.к. их захоронение на пл. 18 осуществляется во II, III коллекторские горизонты, разделяемые горизонтом *C*.

В горизонте *D* на участке полигонов захоронения не выделено подобных зон по данным бурения и опытно-фильтрационных работ, гидродинамических наблюдений при эксплуатации полигонов. Коэффициенты фильтрации горизонта *D*, определенные по данным наблюдений в течение длительных периодов времени, составили $1,20 \cdot 10^{-4}$ м/сут.

Область выклинивания в юго-восточном направлении горизонта *E*, разделяющего верхний, используемый для водоснабжения водоносный комплекс, от нижнего, также достаточно удалена как от полигонов захоронения, так и от водозаборов. Загрязнение водозаборов через эту область практически произойти не может, хотя изменение уровней в IV горизонте в результате интенсивного извлечения вод из IVa, V горизонтов при эксплуатации водозаборов может иметь место.

При проведении геолого-разведочных работ соответствующее внимание было обращено и на фильтрационную неоднородность коллекторских горизонтов. Геофизическими исследованиями, в том числе с применением радиоактивных индикаторов, не были выявлены зоны или интервалы с аномально-высокими фильтрационными свойствами, что в последующем подтвердилось по данным контрольных наблюдений в процессе эксплуатации. Вместе с тем предполагалось, что при высоких давлениях нагнетания отходов (выше давлений гидроразрыва пласта) возможна интенсивная фильтрация растворов по маломощному интервалу, в связи с чем максимальное давление нагнетания отходов было ограничено.

В соответствии с имеющимися фактическими данными палеозойский фундамент в районе СХК характеризуется сравнительно слабой тектонической нарушенностью. Наиболее крупное тектоническое нарушение предполагается в виде кулисообразных зон вдоль р. Томи по ее левому берегу вне пределов территории СХК. В северо-восточной части полигона

захоронения пл. 18 отмечен флексурообразный перегиб осадочных пород без нарушения сплошности слоев, который соответствует уступу фундамента, очевидно, тектонического происхождения. Специальными опытно-фильтрационными работами не была установлена взаимосвязь между горизонтами на участке флексуры, примыкающей к полигону захоронения. В пределах полигона пл. 18 выделен линейament, соответствующий уступу в рельефе поверхности четвертичных отложений, который, однако, с глубиной не прослеживается.

Глубинные тектонические нарушения, предполагаемые отдельными геологами на основании результатов аэромагнитной съемки на сопредельных с территорией СХК площадях, на территории СХК не подтверждаются данными бурения. Вместе с тем в палеозойских образованиях бурением отмечены дайки магматических пород, которые обычно являются основными причинами аномалий магнитного поля.

Современные и четвертичные движения земной коры в районе СХК имеют в целом восходящий характер со скоростью от 0,5 до 1,2 мм в год и не могут в ближайшие тысячи лет кардинально изменить гидро-геологические условия района. Естественная сейсмичность в районе ниже 6 баллов.

Как ясно из вышеизложенного, геологическое строение района СХК позволяет осуществлять глубинное захоронение жидких РАО. В качестве основных доводов в пользу этого вывода могут быть названы:

- в разрезе имеются пластообразно-залегающие песчаные пористые породы (пласты-коллекторы), обладающие достаточными ёмкостными и фильтрационными свойствами для нагнетания в них растворов в заданных объемах и при давлениях ниже гидроразрыва пласта;

- пласты-коллекторы подстилаются и перекрываются слабопроницаемыми глинистыми породами, обладающими водупорными свойствами и распространенными практически повсеместно в пределах области возможного влияния захоронения;

- имеются убедительные доказательства разобщения горизонтом *D* верхнего водоносного комплекса, находящегося под воздействием водозаборов, и нижнего водоносного комплекса, используемого для захоронения отходов;

- скорости естественного движения подземных вод характеризуются значениями 3—5 м/год, что гарантирует локализацию отходов в течение длительных периодов времени в пределах территории СХК, санитарно-защитных зон и горного отвода недр;

— коллекторские горизонты характеризуются в целом фильтрационной однородностью в разрезе и в плане, благодаря чему нет оснований ожидать большой неравномерности заполнения пластов-коллекторов отходами, образования «языков», интервалов максимальной фильтрации, существенно влияющих на площадное распределение отходов;

— в районе СХК не выявлены тектонические структуры, которые могли бы обусловить вертикальную взаимосвязь горизонтов, аномальную миграцию отходов;

— воды пластов-коллекторов характеризуются малым соленосодержанием, что наряду с наличием в составе пород глинистых минералов обуславливает задержку миграции нуклидов — компонентов отходов в результате физико-химических процессов;

— геологическое строение района СХК и гидрогеологические условия изучены при проведении специальных геолого-разведочных работ, включавших бурение большого числа скважин, геофизические и опытно-фильтрационные работы и т. д. (см. р. 3.2). Имеющаяся геологическая информация весьма представительна и позволяет принимать ответственные решения.

Уже первые приближенные прогнозы распределения отходов в коллекторских горизонтах, выполненные на завершающей стадии геолого-разведочных работ, показали, что площадь распространения нетехнологических отходов объемом 50 млн. куб. м во II, III горизонтах составит 7 кв. км, что соответствует кругу с радиусом 1,5 км, и для технологических отходов объемом 5 млн. куб. м во II горизонте составит 2,6 кв. км, что соответствует кругу радиусом 1 км. Возможное последующее смещение отходов под воздействием естественного движения подземных вод оценивалось порядка 5 км за 1 тыс. лет. Эти площади и расстояния находились в пределах территорий основных промобъектов. Результаты геолого-разведочных работ не давали оснований полагать о возможном возникновении каких-либо аномальных явлений, обусловленных геологическим строением и приводящих к интенсивному распространению и миграции отходов.

Полигоны захоронения

Полигоны захоронения жидких РАО (площадки 18 и 18а) расположены вблизи основных производств в пределах границ санитарно-защитной зоны СХК, в которой находятся также и другие объекты обращения с РАО — цех очистных сооруже-

ний, поверхностные бассейны-хранилища, промышленные водоемы, могильники твердых отходов.

В связи с высокой потенциальной опасностью отходов и большой ответственностью принимаемых решений первоначально было осуществлено обоснование и проектирование экспериментального полигона на пл. 18а, включавшего 5 наблюдательных скважин, расположенных в центре полигона, 4 наблюдательные скважины внутреннего наблюдательного контура, расположенные в радиусе 125 м от центра полигона, 5 скважин внешнего наблюдательного контура в радиусе 380—400 м от центра полигона. Для контроля состояния недр использовались также разведочные скважины на расстояниях 1200—1400 м от центра. Схема расположения наблюдательных скважин центральной части полигона приведена на рис. 14.

Первоначально проектом предусматривалось удаление 110 тыс. куб. м среднеактивных технологических отходов из открытых бассейнов-хранилищ. Основной задачей экспериментального полигона являлась проверка в натурных условиях совместимости отходов с геологической средой, устойчивости работы наблюдательных скважин, прогнозов изменения пластовых давлений и заполнения пласта-коллектора отходами, работы поверхностного оборудования.

Давления нагнетания составляли в основном 1,1—2,2 МПа, расходы от 300 до 1000 куб. м в сутки. В наблюдательных скважинах были зарегистрированы изменения напоров, связанные с нагнетанием отходов. На рис. 15 в качестве примера приведены графики напоров (купол репрессии) для скважин экспериментального полигона.

В состав удаляемых отходов—декантата бассейнов-хранилищ, входили соли натрия (нитраты, ацетаты, карбонаты, сульфаты), кремнекислота и некоторые другие примеси. Общее солесодержание составляло 160—200 г/л, удельная активность $10^{-2} \div 10^{-1}$ Ки/л. Радионуклидный состав был представлен стронцием, цезием, рутением, церием и др. По результатам отбора и анализа проб пластовой жидкости из наблюдательных скважин установлено закономерное появление в них компонентов отходов. На рис. 16 приведены графики изменения удельной активности фильтрата отходов в скважинах.

Рост активности в период 06—08.1963 г. обусловлен прохождением через сечение скважин зоны дисперсии отходов и подземных вод, периодическое снижение активности пластовой жидкости связано с остановками нагнетания. Активность в пластовой жидкости на 1—2 порядка ниже активности

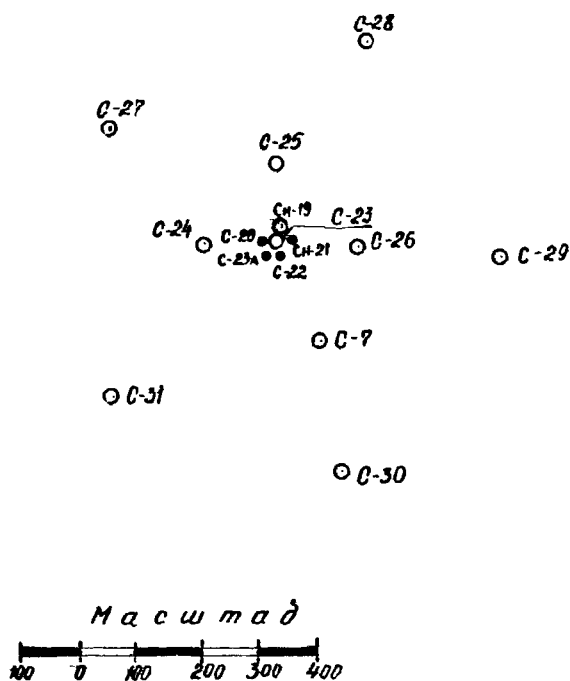


Рис. 14. Схема расположения ● нагнетательных и ⊙ наблюдательных скважин на экспериментальном полигоне

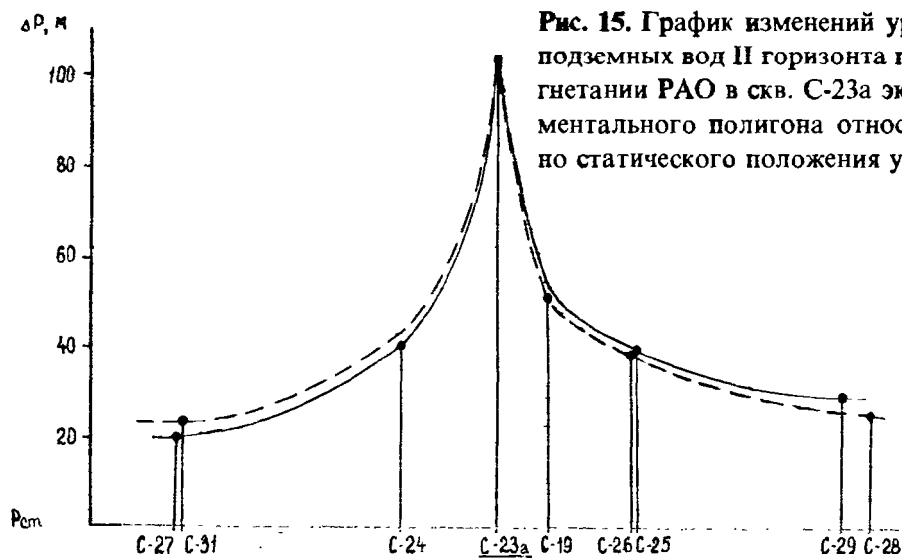


Рис. 15. График изменений уровней подземных вод II горизонта при нагнетании РАО в скв. С-23а экспериментального полигона относительно статического положения уровня.

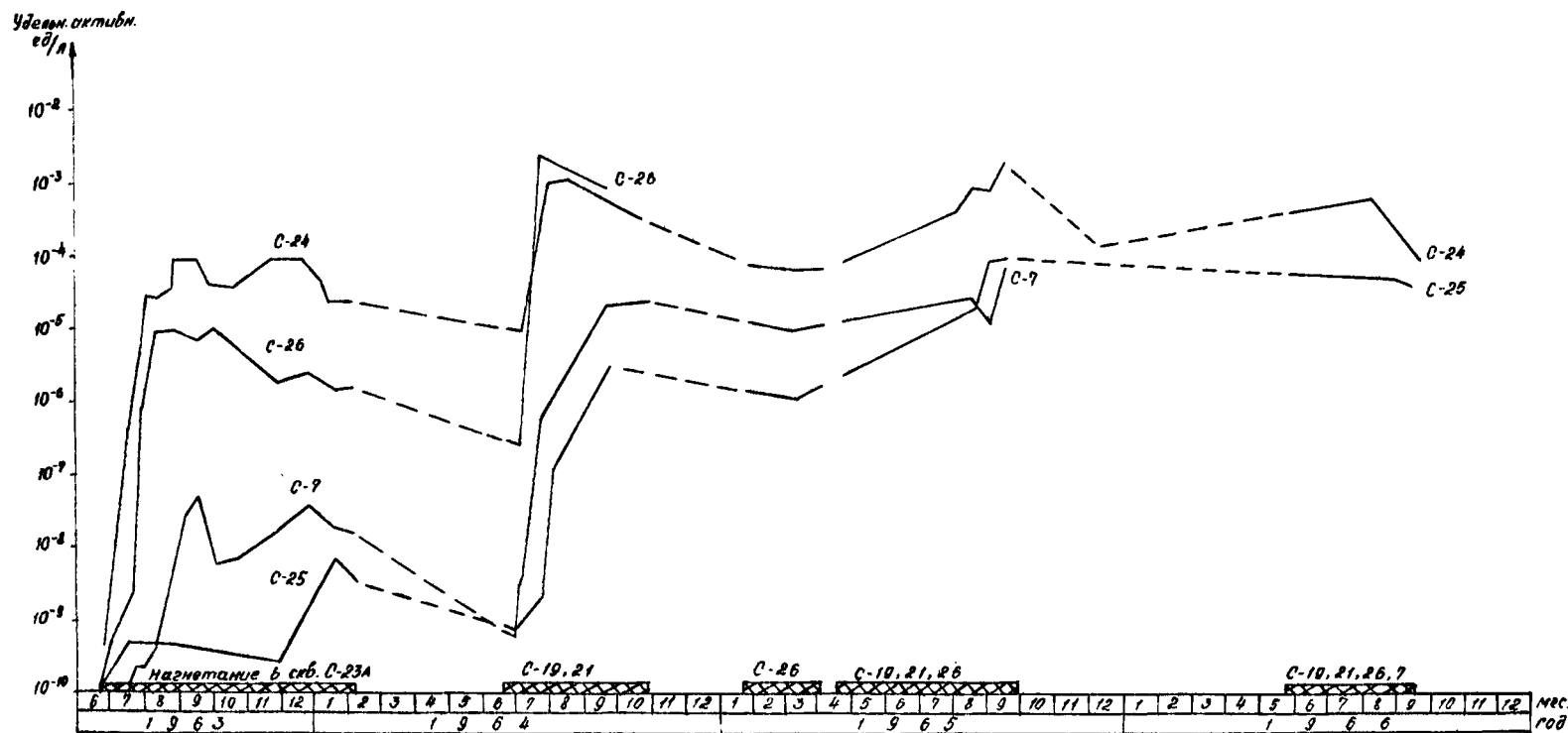


Рис. 16. Изменение удельной активности пластовой жидкости в наблюдательных скважинах экспериментального полигона

в отходах, что обусловлено сорбционной задержкой некоторых нуклидов, несмотря на высокое солесодержание отходов.

Полученные результаты в целом подтвердили представления о закономерностях распределения отходов, позволили уточнить ряд исходных данных, которые в последующем были приняты при проектировании.

Положительные результаты захоронения технологических отходов на экспериментальном полигоне позволили продолжить его работу до 1975–80 гг. После решения основной задачи часть скважин полигона была ликвидирована по специальному проекту, другие оставлены для проведения контрольных наблюдений. Общий объем захоронения отходов на экспериментальном полигоне составил 2,1 млн. куб. м.

Результаты экспериментальных работ позволили приступить к проектированию и строительству опытного полигона для захоронения нетехнологических низкоактивных отходов — пл. 18 и промышленного полигона для захоронения технологических отходов — собственно пл. 18а.

Значительные объемы захоронения нетехнологических отходов до 6300 куб. м/сут обусловили иную схему полигона. В центре полигона было предусмотрено 2 ряда нагнетательных скважин типа «Н» (11 скважин), вскрывающих II и III горизонты. Наблюдательные скважины и резервные нагнетательные располагаются концентрически вокруг нагнетательного контура (около 100 скважин). На внешней границе пл. 18 размещено 26 разгрузочных скважин (рис. 17). Расстояния от центра полигона до границы (проектного контура распространения отходов) составляют 1,6–2,0 км, площадь полигона около 10 кв. км, полезный объем пластов-коллекторов II, III горизонтов 60 млн. куб. м.

Выбору схемы полигона предшествовали опытные работы и моделирование режимов эксплуатации с использованием сеточного электроинтегратора, выполненные специалистами института ВНИИнефть. Разгрузочный контур был предусмотрен с целью корректировки развиваемого купола репрессии и снижения давлений нагнетания отходов, управления движением их контура. Однако результаты первых лет эксплуатации полигона показали, что рост пластовых давлений в центральной части полигона и на оголовках нагнетательных скважин в целом невелик вследствие периодических остановок нагнетания по технологическим причинам и перераспределения давлений, радиоактивные нуклиды интенсивно задерживаются породами, удельная емкость пласта оказалась выше прогнозной. Эти факторы позволили не форсировать работы по разгрузке пласта-коллектора.

Опытный полигон захоронения пл. 18 был введен в эксплуатацию в 1967 г., максимальные давления нагнетания были приняты 2,5 МПа для II горизонта и 2,0 МПа для III горизонта, суммарные проектные расходы нагнетания были приняты 6300 куб. м/сут, а фактически не превышали 5500 куб. м/сутки.

В течение первых 8—10 лет нагнетание отходов осуществлялось через 2—3 одновременно работающих скважины на каждый горизонт с неравномерными расходами и периодическими остановками. Расход нагнетания колебался от 1000 до 2500 куб. м в сутки для II горизонта и от 1000 до 3000 куб. м в сутки для III горизонта. В связи с кольматацией прифилтровых зон коллекторов содержащимися в отходах взвесями расходы нагнетания снижались и количество одновременно работающих скважин увеличивалось.

Безразмерные сопротивления прифилтровых зон скважин, характеризующие совершенство скважины по характеру вскрытия (сообщаемости) пласта, увеличивались от единиц на начальном этапе до 90 на завершающих этапах работы скважин. Общие объемы нагнетания в каждую из скважин типа «Н» составили несколько более 1 млн. куб. м, а в скважины Н-1, -7, -4 более 3 млн. куб. м. После выработки эксплуатационных ресурсов и вследствие ухудшения технического состояния скважины типа «Н» были ликвидированы по специальному проекту и введены в эксплуатацию резервные нагнетательные скважины типа «АН». С 1989 г. нагнетание отходов осуществляется только через эти скважины.

В результате нагнетания отходов в районе пл. 18 сформировался купол репрессии. Увеличение пластового давления относительно естественного в центральной части полигона составляет 10—15%. На рис. 18 в качестве примера приведен график распределения купола репрессии в пласте-коллекторе II горизонта полигона пл. 18, зафиксированный по результатам измерений в наблюдательных скважинах и рассчитанный теоретически.

В составе удаляемых низкоактивных отходов на пл. 18 содержатся нитрат- и сульфат-ионы, детергенты.

Солесодержание не превышает 20 г/л, рН от 6 до 10,5, общая удельная активность от $n \cdot 10^{-8}$ до $n \cdot 10^{-6}$ Ки/л. Радионуклиды представлены главным образом изотопами стронция, рутения, цезия, церия. Тритий содержится в малых концентрациях. Долгоживущие альфа-излучающие нуклиды могут содержаться в следовых количествах.

Присутствие компонентов отходов в наблюдательных скважинах отмечалось по увеличению общего солесодержания, обнаружению нитрат- и сульфат-ионов в концентрациях выше

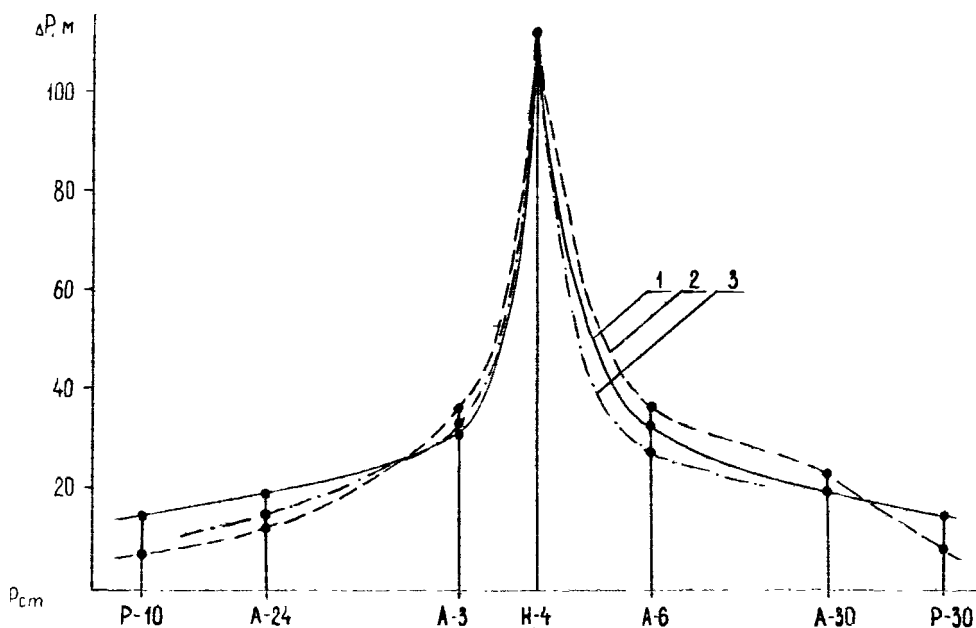


Рис. 18. График изменений уровней подземных вод II горизонта при нагнетании РАО в скв. Н-4 полигона пл. 18 относительно статического положения уровня. 1 — прогноз, 2 — 23.04.67 г., 3 — 16.03.82 г.

пороговых, трития. Радионуклиды не были зафиксированы в скважинах, в том числе наиболее близких и расположенных на расстояниях 200—300 м от нагнетательных. В то же время в нагнетательных скважинах, по данным гамма-каротажа, отмечены высокие гамма-поля (до 6000 мкр/час), свидетельствующие об интенсивном накоплении нуклидов в поглощающих интервалах пласта-коллектора. В геофизических (глухих) скважинах, расположенных вблизи нагнетательного контура, интервалы фильтрации отходов, закачанных в зимнее время, отмечались по снижению температуры.

Анализ результатов наблюдений при эксплуатации полигона захоронения пл. 18 показал, что емкость пластов-коллекторов несколько выше предполагавшейся, вследствие больших значений эффективной пористости, возрастающей при длительном контакте отходов с породами.

На рис. 17 приведены объединенные для II и III горизонтов контуры распространения отходов для периода эксплуатации до 1988 г. (нагнетание в скважины типа «Н») и внешние контуры для периода эксплуатации до 1992 г. (нагнетание в скважины типа «АН»). Внешний контур отходов включает также «целики» подземных вод между контурами скважин «Н» и «АН».

Контуры определялись на основании моделирования и расчетов с использованием данных о наличии загрязняющих компонентов в скважинах, об объемах и режимах нагнетания, структуры фильтрационного потока и т. д.

Общий объем удаленных отходов на пл. 18, по данным на 01.01.93 г. составил 33,8 млн. куб. м, что составляет около 56% от проектного объема. При площади заполнения отходами 3,6 кв. км суммарная удельная эффективная емкость пластов-коллекторов II, III горизонтов составляет ~ 10 м, что соответствует при суммарной эффективной мощности II, III горизонтов 60 м средней эффективной пористости 0,17. Эти величины хорошо совпадают с данными таблицы 5.1.

Опытно-промышленный полигон захоронения технологических отходов пл. 18а (Западный участок, рис. 19) является,

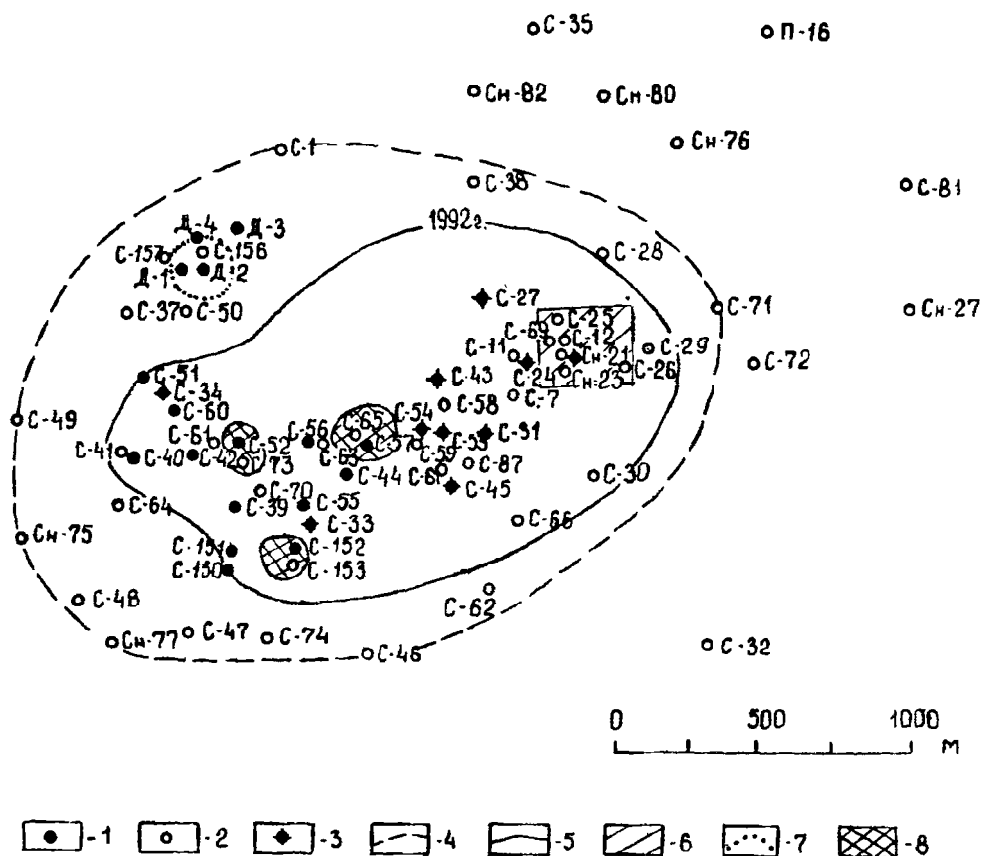


Рис. 19. Схема расположения скважин и контуров распространения отходов пл. 18 а, СХК

1 — нагнетательные скважины; 2 — наблюдательные скважины; 3 — ликвидированные скважины; 4 — проектный контур распространения отходов; 5 — контур среднеактивных отходов; 6 — экспериментальный полигон; 7 — контур декантата бассейнов Б-1,2; 8 — контур высокоактивных отходов.

по существу, развитием экспериментального полигона и размещен в непосредственной близости от него. Часть скважин экспериментального полигона и его территория были включены в пл. 18а. Проектом пл. 18а предусмотрено 16 нагнетательных скважин и 42 наблюдательных (включая скважины экспериментального полигона). В последующем наблюдательная сеть скважин была расширена — около эксплуатирующихся нагнетательных скважин пробурены наблюдательные на IV (буферный) горизонт.

В составе полигона предусмотрено 4 «куста» скважин для опытно-промышленного периодического (порционного) удаления отходов, условно называемых высокоактивными. Каждый куст состоит из нагнетательной скважины, вскрывающей II коллекторский горизонт, и расположенной в непосредственной близости от нагнетательной на расстояниях 14—20 м геофизической («глухой») скважины, позволяющей выполнить геофизические измерения непосредственно в интервале поглощающего горизонта без контакта с отходами. В первых нагнетательных скважинах, использованных для захоронения высокоактивных отходов, были предусмотрены измерительные («глухие») колонны, расположенные на оси скважины, в которых проводились геофизические измерения.

В последующем в соответствии с проектом в северо-западной части пл. 18а были сооружены дополнительные нагнетательные и наблюдательные скважины для удаления декантата бассейнов-хранилищ, образующихся при их промывке и консервации.

Подготовка отходов к захоронению осуществлялась в технологических комплексах радиохимического завода, откуда они направлялись на пл. 18а по трубопроводу. Проектный объем нагнетания среднеактивных отходов составлял 550 куб. м в сутки, фактически был существенно меньше, особенно в последние годы. Давления нагнетания не превышали 1,6 МПа и в отдельных случаях достигали 1,9 МПа. В связи с особенностями работы основных производств нагнетания выполняли с перерывами.

Опытно-промышленное удаление условно называемых высокоактивных отходов осуществлялось периодически от 1 до 2—3 раз в год ограниченными порциями по 1—2 тыс. куб. м. Нагнетание осуществлялось в режиме свободного налива или при давлениях 0,5—0,6 МПа.

По данным наблюдений, нагнетание среднеактивных отходов отмечается закономерным увеличением пластового давления II горизонта. На пл. 18а отмечается также реакция уровней подземных вод II и III горизонтов на нагнетание отходов

на пл. 18. После остановки нагнетания технологических отходов уровни жидкости в нагнетательных скважинах устанавливаются ниже поверхности земли через 1—2 суток и менее, что обусловлено относительно малыми объемами нагнетания и большим удельным весом отходов по сравнению с подземными водами. По этим же причинам наблюдается быстрое выравнивание купола репрессии по площади II горизонта после остановки нагнетания. Удаление высокоактивных отходов практически не влияет на форму пьезометрической поверхности подземных вод II горизонта.

Среднеактивные отходы представлены солевыми растворами с солесодержанием до 300 г/л, слабощелочные. Химический и радиохимический состав аналогичен удаленным на экспериментальном полигоне. Высокоактивные отходы характеризуются солесодержанием до 220 г/л, рН 2-3 (см. р. 1.2, 3.3). Особенностью подготовки высокоактивных отходов к захоронению является введение комплексообразующих соединений, корректировка кислотности.

Перед удалением высокоактивных отходов осуществляется подготовка пласта-коллектора путем нагнетания слабокислых растворов. После удаления порции высокоактивных отходов осуществляется ее оттеснение из прифильтровой зоны пласта. Средняя удельная активность смеси отходов, подготавливающих и оттесняющих растворов не превышает нескольких Ки в литре.

В связи с наличием карбонатной составляющей в породах пласта-коллектора и взаимодействием кислых высокоактивных отходов со щелочными происходит нейтрализация высокоактивных отходов, образование слаборастворимых соединений, захватывающих и соосаждающих нуклиды. Разогрев геологической среды и радиационно-химические явления интенсифицируют эти процессы. По данным лабораторных исследований, в твердую фазу может переходить до 95—98% нуклидов, а оставшийся в поровом пространстве фильтрат отходов является среднеактивным.

Присутствие компонентов захораниваемых отходов на участке наблюдательной скважины фиксируется увеличением солесодержания, содержания нитратов, удельной активности, значений гамма-поля и температуры.

На рис. 20 приведены характерные диаграммы гамма-каротажа и термометрии в наблюдательных скважинах пл. 18а, в которых зафиксированы среднеактивные отходы. На рис. 19 приведен контур их распространения, построенный по данным наблюдений и расчетов. Суммарная активность удаленных высокоактивных отходов в ~2 раза выше, чем среднеактивных,

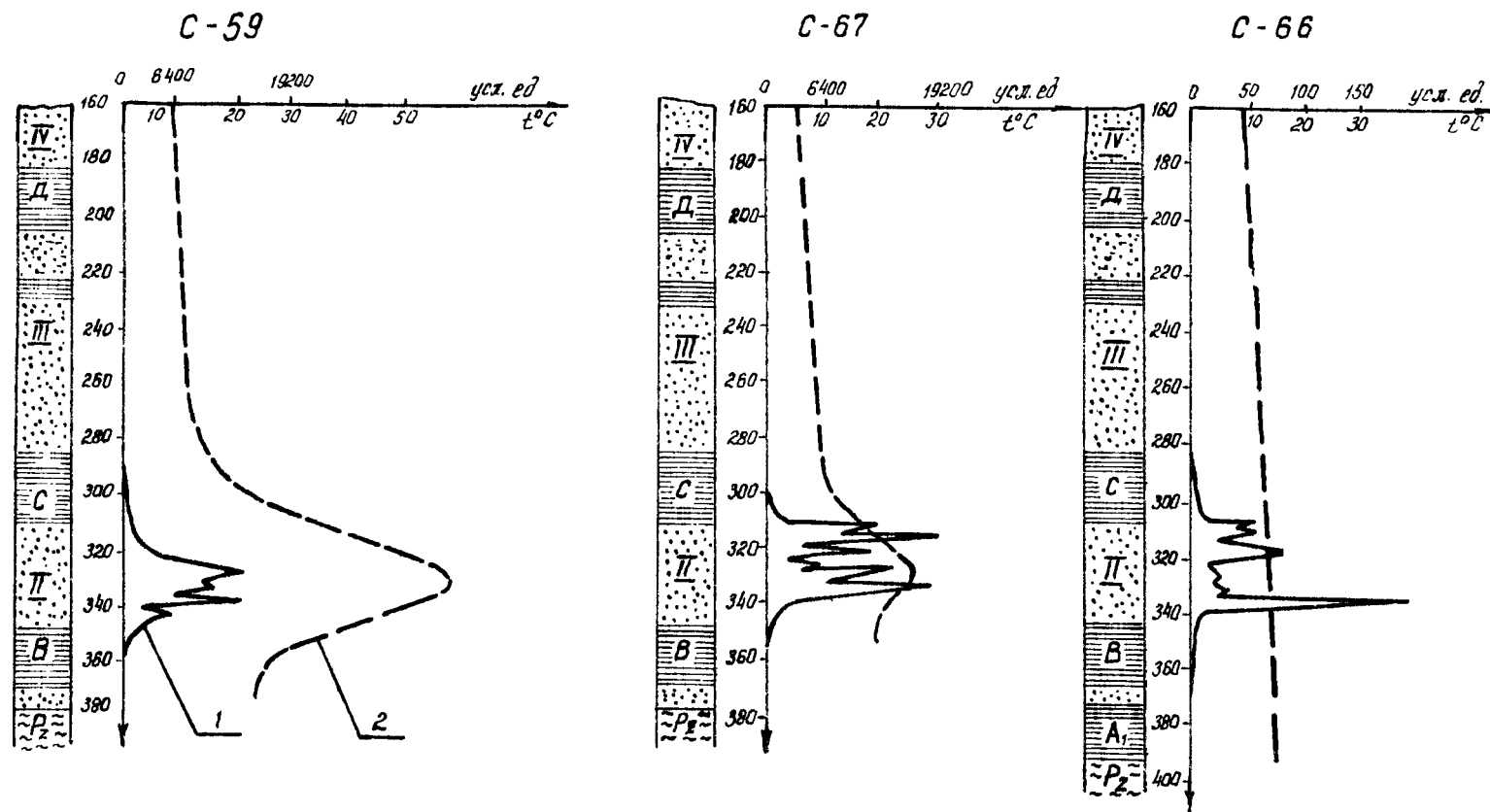


Рис. 20. Результаты геофизического контроля наблюдательных скважин полигона захоронения РАО площадки 18а
1—гамма-каротаж; 2—термометрия

в то же время их физический объем (куб. м) примерно в 30 раз меньше. Соответственно и площадь распространения высокоактивных отходов, находящихся в зоне среднеактивных отходов, в несколько десятков раз меньше.

Результаты контроля распространения высокоактивных отходов по данным наблюдений в нагнетательной и близрасположенной геофизической скважине приведены на рис. 21. По данным гамма-каротажа отмечается заполнение проницаемых слоев II горизонта, суммарная мощность которых увеличивается со временем. Повышением температуры отмечается разогрев пород вследствие энерговыделения радиоактивного распада. Характерной особенностью являются локализация отходов в проницаемых слоях средней части II горизонта и отсутствие внутрипластовых перетоков между слоями, несмотря на длительный период проведения наблюдений. Мало-мощные глинистые слои в пределах поглощающего горизонта препятствуют перераспределению отходов в вертикальном направлении по мощности горизонта.

Изменение максимальной температуры в наблюдательной скважине (рис. 22) удовлетворительно соответствует прогнозам. Отмечается снижение температуры через некоторое время после прекращения нагнетания.

Для уточнения характера взаимодействий компонентов отходов с породами пласта-коллектора были проведены специальные опытные работы по нагнетанию декантата (среднеактивные отходы) из бассейнов-хранилищ при их консервации с отбором проб подземных вод из скважин, расположенных на расстоянии 50 м. Результаты опытных работ приведены в р. 3.3.

Контроль окружающей среды и оценка безопасности захоронения РАО

Полигоны захоронения отходов пл. 18, 18а и территория СХК в целом находятся в интенсивно развивающемся районе с широким использованием подземных вод в хозяйственно-бытовых целях. Водозаборы № 1, 2 Томска-7 (г. Северск) и собственно СХК находятся в 8—9 км к югу и юго-западу от полигонов захоронения. Объемы водоотбора составляют не менее 20—30 тыс. куб. м в сутки.

Водозабор г. Томска (Левобережный) находится в Обь-Томском междуречье, был введен в эксплуатацию в 1973 г., объем водоотбора составляет более 140 тыс. куб. м в сутки. Восточная ветвь водозабора, расположенная вдоль левого берега р. Томь, находится на расстоянии более 14 км от полигонов захоронения (рис. 23).

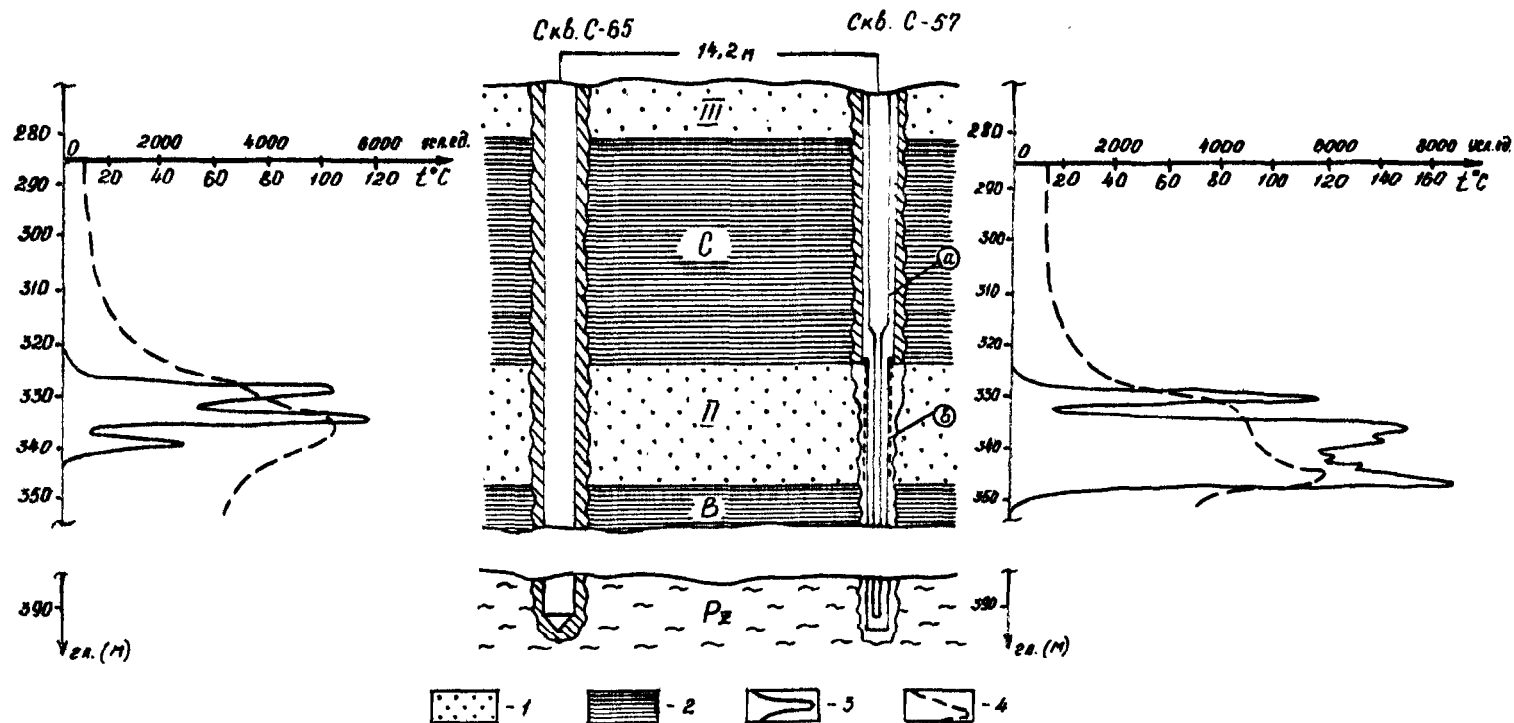


Рис. 21. Геолого-геофизический разрез по линии скважин С-65÷С-57

1 — проницаемые песчаные породы; 2 — слабопроницаемые глинистые породы; 3 — график гамма-каротажа; 4 — график термометрии;
а — измерительная колонна; в — фильтровая колонна.

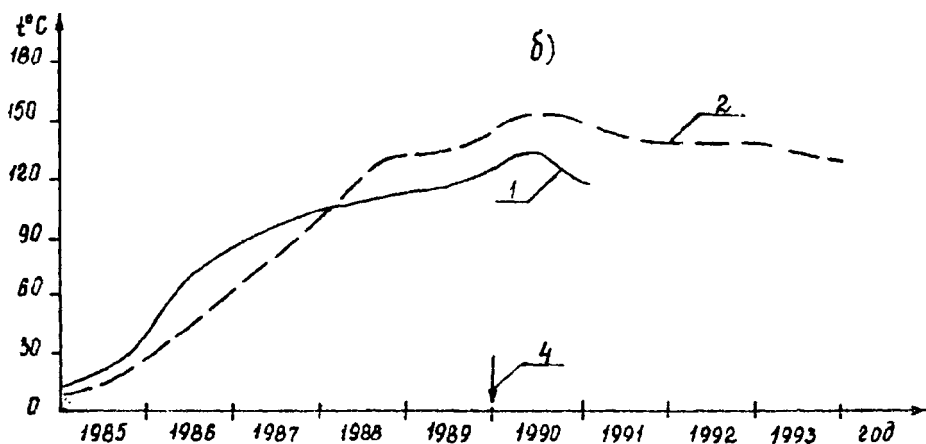
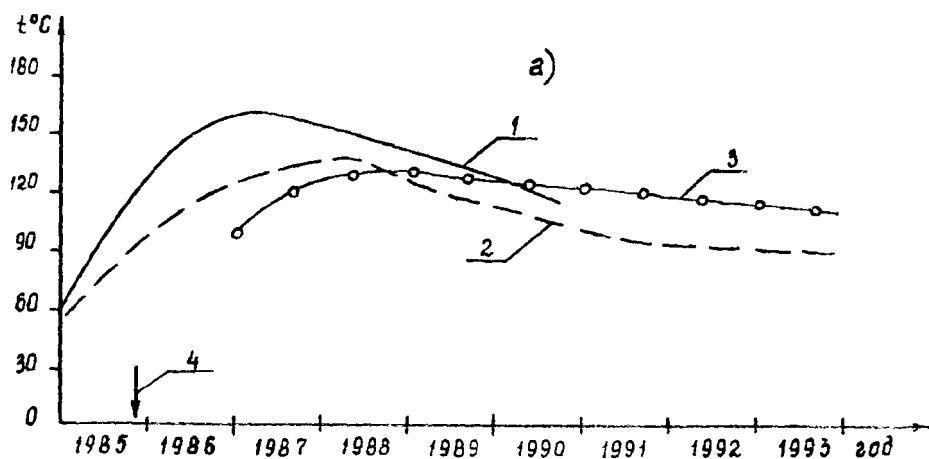


Рис. 22. Изменение максимальной температуры II горизонта пл. 18а при захоронении высокоактивных отходов

1 — температура в нагнетательной скважине; 2 — температура в наблюдательной скважине; 3 — прогнозная температура; 4 — прекращение захоронения отходов.
а) скважины С-57, С-65; б) скважины С-52, С-73.

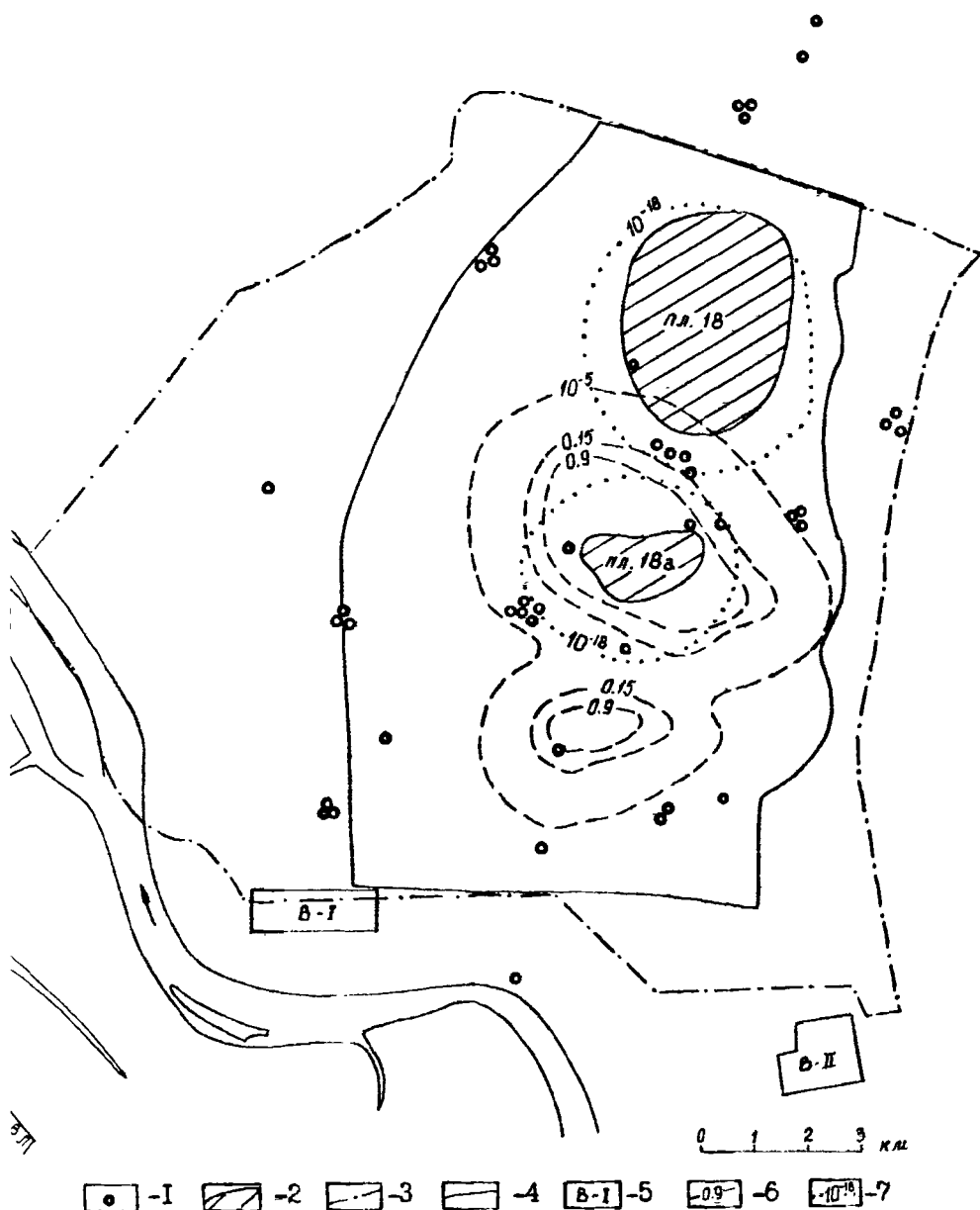


Рис. 23. Схема расположения скважин единой системы контроля недр и прогнозные границы миграции отходов

1—скважины; 2—полигоны пл. 18, 18а; 3—граница санитарно-защитной зоны предприятия; 4—граница горного отвода недр; 5—водозаборы подземных вод: I, II, Левобережный; 6—изолиния содержания индикатора отходов $\bar{C}=0,9$, $t=1$ тыс. лет; 7—изолиния содержания стронция-90 с $\bar{C}=10^{-19}$, $t=1$ тыс. лет (\bar{C} —относительная концентрация).

В непосредственной близости от полигонов захоронения расположены поверхностные бассейны-хранилища жидких радиоактивных отходов, пульпо и водохранилища, способные оказывать воздействие на подземные воды.

При обосновании глубинного захоронения жидких РАО в начале 60-х годов учитывалось существование водозаборов № 1, 2, была показана безопасность совместной эксплуатации водозаборов и захоронения отходов. Наличие полигонов учитывалось при создании Левобережного водозабора, введенного через 10 лет после начала захоронения жидких РАО. На водозаборах 1, 2 и Левобережном эксплуатируются водоносные горизонты V, VI и частично IVa верхнего водоносного комплекса. Эти горизонты отделены от нижнего водоносного комплекса и используемых для захоронения горизонтов II и III слабопроницаемыми глинистыми горизонтами E и D, буферным горизонтом IV, заключенным между ними.

Водозаборы подземных вод и полигоны захоронения достаточно разнесены и по площади. Водозаборы 1, 2 и Левобережный находятся вне пределов горного отвода недр полигонов захоронения. По данным прогнозов, компоненты захороненных отходов, мигрирующие во II, III горизонтах, не достигнут участков водозаборов за период 1 тыс. лет даже без учета их взаимодействия с породами. На рис. 23 в качестве примера приведены результаты прогнозных расчетов миграции компонентов РАО: не взаимодействующего с породами стабильного индикатора, например нитрата натрия, и стронция-90, поглощаемого породами с коэффициентом межфазного распределения $K_p = 0,5 \text{ см}^3/\text{г}$. Прогнозные расчеты выполнялись по методикам, рассмотренным в р. 3.4.

Аналогичные данные были получены и для случая миграции компонентов РАО в IV горизонте при его случайном загрязнении. Несколько меньшие значения времени миграции будут для горизонтов V и VI при их эксплуатации водозаборами 1 и 2, однако вследствие физико-химических процессов взаимодействия компонентов РАО с породами водозаборы 1 и 2 не могут быть загрязнены.

В связи с высокой потенциальной опасностью производств СХК, полигонов захоронения и поверхностных хранилищ РАО, интенсивным использованием недр в районе СХК создается Единая система контроля недр (ЕСКН), предназначенная для сбора информации о состоянии геологической среды и подземных вод, изучения естественных геологических явлений и процессов, сопровождающих захоронение отходов, установления и разграничения областей влияния источников загрязнения.

ЕСКН включает контрольно-наблюдательные скважины, необходимые приборы и оборудование, транспортные средства, специальную лабораторию и т.д.

Контрольно-наблюдательные скважины в пределах и в непосредственной близости полигонов захоронения входят в подсистему внутреннего контроля ЕСКН. Скважины контролируют все выделенные в разрезе горизонты, включая отложения палеозоя, используемые для захоронения II и III горизонты, неглубокозалегающие горизонты и грунтовые воды. Расположение и количество скважин учитывают требования своевременного получения необходимой информации о распространении отходов в коллекторских горизонтах и об отсутствии загрязнений в вышележащих, развитии гипотетических осложнений и аварийных ситуаций. Так, около нагнетательной скважины располагается наблюдательная скважина, вскрывающая буферный IV горизонт, позволяющая своевременно обнаружить, например, возникновение предпосылок взаимосвязи между горизонтами по затрубному пространству или другой дефект нагнетательной скважины и принять меры по предупреждению осложнений.

В подсистему внешнего контроля входят 9 «кустов» скважин и одиночные скважины, расположенные за пределами промобъектов СХК. В составе «куста» имеется от 3 до 5 скважин, расположенных в непосредственной близости друг от друга и вскрывающих различные горизонты (рис. 23). Размещение скважин внешнего контроля принято на основе моделирования и расчетов возможной миграции компонентов отходов, с учетом уже существующих скважин и расположения водозаборов 1, 2, которые также выполняют функции контроля относительно Левобережного водозабора.

В скважинах проводятся гидродинамические и геофизические наблюдения и измерения, отбор проб на различные виды анализа (см. р. 4.2). В отбираемых пробах подземных вод определяются 20—25 показателей их состава, включая тритий.

Наблюдения в подсистеме внутреннего контроля выполняются службой эксплуатации полигонов захоронения, внешний контроль осуществляется организациями Роскомнедра. По данным наблюдений отмечается локализация отходов в пределах контрольных границ полигонов захоронения. За пределами полигонов и горного отвода недр загрязнений не обнаружено.

Положение контуров отходов в разрезе контролируемого района приведено на рис. 24.

Опыт глубинного захоронения РАО в течение 30 лет позволяет достаточно объективно оценить безопасность эксплуата-

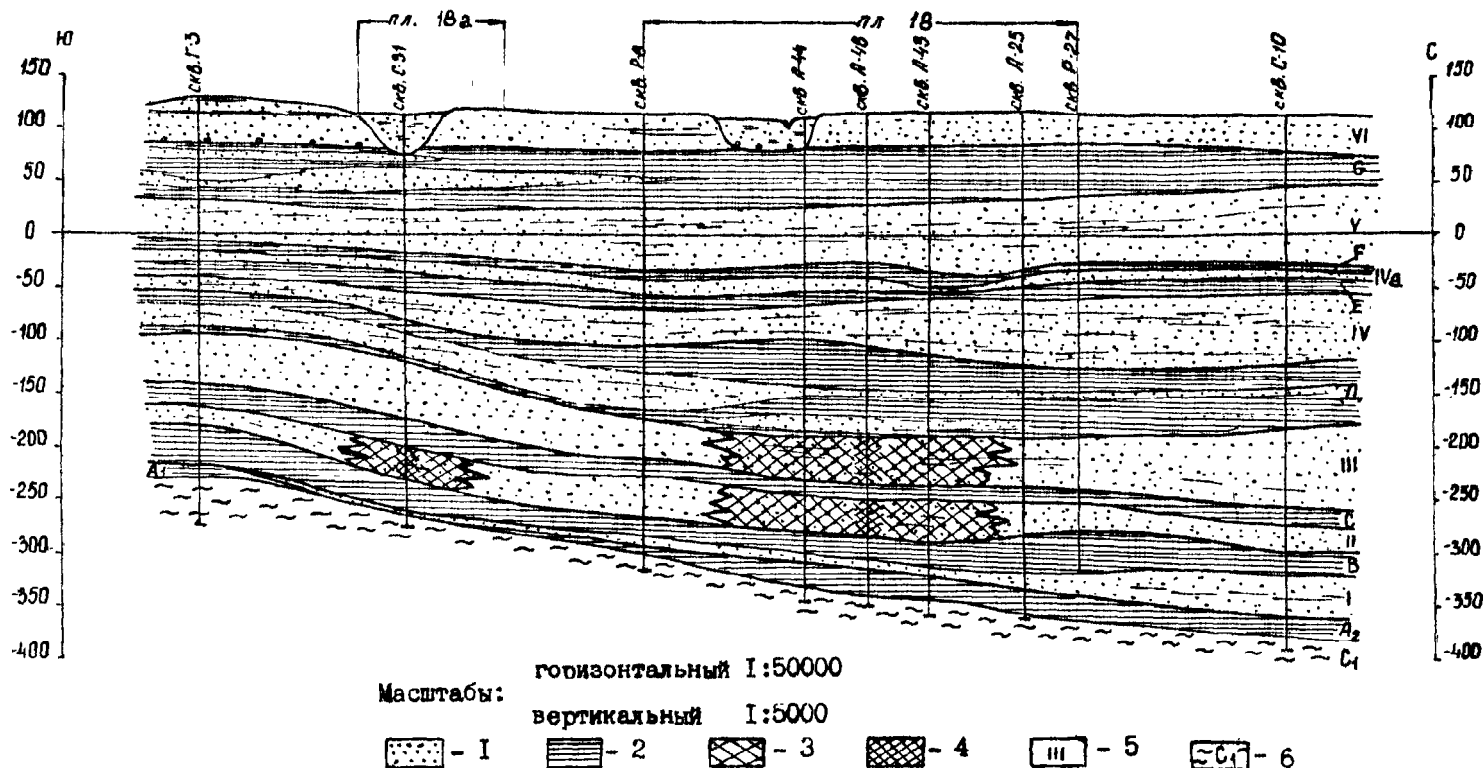


Рис. 24. Схематический разрез по полигонам пл. 18 и 18а.

1 — проницаемые песчано-глинистые породы; 2 — слабопроницаемые глинистые породы; 3 — область распространения отходов; 4 — участки максимального концентрирования нуклидов; 5 — условные индексы горизонтов; 6 — отложения палеозоя.

ции полигонов пл. 18, 18а. За этот период не наблюдались события, последствия которых повлияли или могут повлиять в дальнейшем на санитарно-радиационную обстановку за пределами полигонов захоронения, санитарно-защитных зон и горного отвода недр.

Характер распределения отходов и процессов изменения геологической среды в целом подтвердил ранее сформированные представления о свойствах и строении геологической среды и выполненные прогнозы. Высокие задерживающие свойства пород по отношению к нуклидам, доказанные опытными данными, являются дополнительной гарантией безопасности захоронения жидких РАО.

Результаты анализа гипотетических осложнений и аварийных ситуаций, проведенного с использованием ранее рассмотренных методических подходов (р. 3.5) применительно к условиям СХК, также показали, что последствия аварийных ситуаций не могут носить катастрофический характер, а вероятность их реализации весьма мала.

Проведение экспериментальных и опытных работ в условиях максимально приближенных к промышленным. захоронение впервые в мировой практике значительных объемов жидких РАО не могло не сопровождаться определенными трудностями и осложнениями, что является вполне естественным. Тем не менее имевшие место осложнения не свидетельствуют о существовании каких-либо предпосылок неуправляемого развития негативных процессов, способных вызвать серьезные аварийные ситуации. Наиболее значимые осложнения, имевшие место при эксплуатации полигонов захоронения СХК, рассмотрены ниже.

При проведении исследований на экспериментальном полигоне в 1963 г. имело место интенсивное газовыделение из наблюдательной скважины, повлекшее вынос газированной жидкости, содержащей компоненты РАО, загрязнение участка поверхности менее 0,1 га. В результате специальных исследований было установлено, что причиной газовыделения являлось развитие деятельности денитрифицирующих бактерий, которая подавлялась высоким солевым фоном отходов в поверхностном хранилище отходов (бассейне) и активизировалась в зоне смешения (дисперсии) отходов, содержащих нитраты, и подземных вод в пласте-коллекторе. Интенсивному газовыделению из скважины способствовали образование «висячей» песчаной пробки, препятствующей равномерной дегазации пласта, чистка песчаной пробки непригодным для этой цели оборудованием, демонтаж устьевой задвижки. После

корректировки технологии подготовки отходов интенсивное газовыделение из скважин не наблюдалось. В составе выделившегося газа были отмечены молекулярный азот, незначительные количества кислорода, углекислого газа и др.

На полигоне захоронения пл. 18 было обнаружено ухудшение технического состояния нагнетательных скважин, пробуренных в начале 60-х годов. Скважины находились в эксплуатации 10—15 лет, в них было удалено более 1 млн. куб. м низкоактивных отходов. По данным контрольных наблюдений, была обнаружена реакция уровней подземных вод IV горизонта (буферного) в скважине, расположенной вблизи с нагнетательной, обусловленная возникновением взаимосвязи между III и IV горизонтом по затрубному пространству нагнетательной скважины. Как показало специальное обследование, включавшее анализ материалов сооружения скважины, опытные нагнетания индикаторов, геофизические измерения, предпосылками возникновения взаимосвязи являлись интенсивные откачки подземных вод, проводившиеся для освоения прифилтровой зоны при сооружении скважины и сопровождавшиеся выносом пластового материала. Это привело, очевидно, к разуплотнению толщи пород выше III горизонта и возникновению каналов фильтрации.

Взаимосвязь горизонтов была обнаружена сразу после ее возникновения (определения положения уровня в наблюдательных скважинах вблизи нагнетательных выполняются 1 раз в сутки), объем поступления растворов в IV буферный горизонт был незначителен, по данным прогнозов, миграция загрязнений в IV горизонте не достигнет границ полигона.

В последующем все нагнетательные скважины этого типа были обследованы по специальной программе, их эксплуатационные ресурсы снижены, затем они были законсервированы по специальному проекту с дополнительным разобшением затрубного пространства. В 1988 г. были введены в эксплуатацию резервные нагнетательные скважины, сооружавшиеся по иной технологии. При бурении исследовательских и инъекционных скважин вблизи нагнетательных были отобраны образцы пород и подземных вод, изучение которых подтвердило высокие задерживающие свойства песчано-глинистых пород по отношению к нуклидам.

Имели место также негерметичность муфтового соединения обсадной колонны скважины («свищ»), течи трубопроводов и арматуры, проливы загрязненных проб, ухудшение принимающей способности скважины и т. д. Все эти инциденты не привели к загрязнению объектов за пределами I пояса санитарно-защитной зоны полигонов захоронения

(зоны строгого режима) и не создали предпосылок такого загрязнения в последующем. Они соответствуют происшествиям категории 2 международной шкалы событий на АЭС (INES) — «событие с потенциальными последствиями для безопасности», что является вполне приемлемым, учитывая значительные объёмы удаленных отходов.

Значение глубинного захоронения жидких РАО СХК для окружающей среды может быть проиллюстрировано сопоставлением с альтернативной технологией обращения с отходами, которая применялась при отсутствии захоронения. Учитывая опыт предприятия «Маяк» на Южном Урале, такой технологией являлось бы хранение РАО в многочисленных поверхностных бассейнах и водоемах, технологических емкостях. Аэрозольный унос и загрязнения поверхности, возможные смерчи и другие природные явления в сочетании с близостью крупного города создавали бы реальную угрозу и не могли бы пройти бесследно для населения.

5.2. ПОЛИГОНЫ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО ГОРНО-ХИМИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Геологическая характеристика

Геологические условия района размещения системы захоронения отходов ГХК (полигон «Северный») имеют ряд сходных черт с районом полигонов пл. 18, 18а СХК. Коллекторские горизонты сложены слабосцементированными песчано-глинистыми породами и изолированы толщами слабопроницаемых глинистых пород, характеризуются близкими значениями фильтрационных и емкостных параметров, скоростей естественного движения подземных вод. Вместе с тем имеются и существенные различия, обусловленные иным геолого-структурным планом района полигона «Северный», который расположен в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы, Южно-Енисейского кристаллического массива и юго-восточной части Чулымо-Енисейской впадины.

Участок полигона находится в пределах древней эрозинной впадины с максимальной глубиной от поверхности 550 м, заполненной толщей песчано-глинистых юрских отложений (рис. 25). В восточном, южном и юго-восточном направлениях мощность песчано-глинистой толщи уменьшается и на поверхность выходят скальные породы. С запада впадина ограничена тектоническим нарушением меридиональной протяженности, плоскость которого заглинизирована и изолирует породы опущенного блока от пород приподнятого блока.

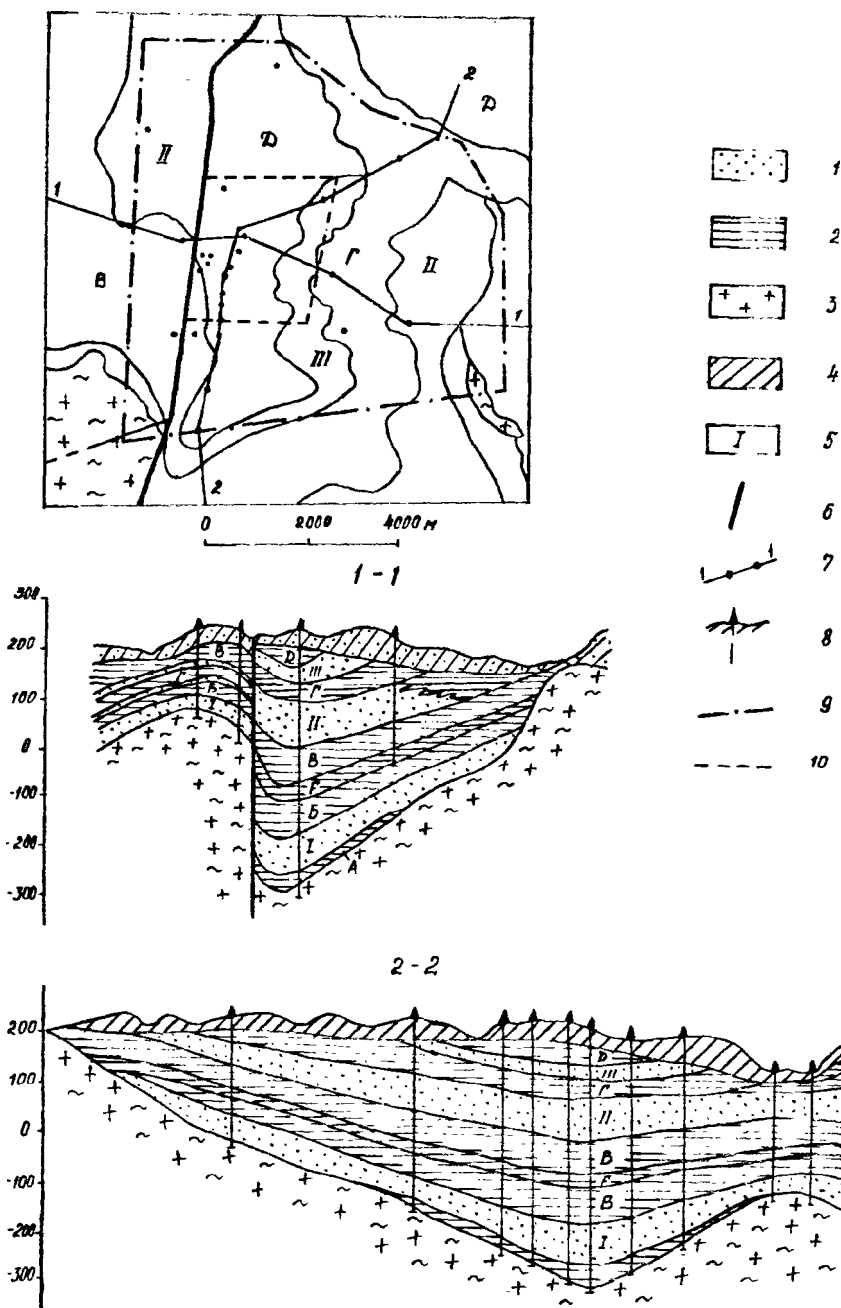


Рис. 25. Геологическая схема района полигона глубинного захоронения жидких отходов

1 — проницаемые породы; 2 — слабопроницаемые породы; 3 — скальные породы; 4 — аллювиальные отложения; 5 — условный индекс горизонтов; 6 — тектоническая зона (экран); 7 — линия геологического разреза и разведочные скважины (план); 8 — разведочные скважины; 9 — граница горного отвода недр; 10 — полигон захоронения.

Ярко выраженный синклинальный характер структуры, ее закрытость и ограниченность площадного распространения заполняющих структуру осадочных песчано-глинистых образований позволили уже на предварительной стадии геолого-разведочных работ прийти к выводу о благоприятных условиях для захоронения отходов. Определенную озабоченность вызывало тектоническое нарушение в западной части структуры. При проведении геолого-разведочных работ были выполнены специальные исследования по изучению зоны нарушения, определения его гидрогеологической роли. В состав работ входило бурение скважин со вскрытием плоскости тектонического нарушения, геофизические работы, опытные откачки с прослеживанием положения уровней в скважинах противоположного блока.

Было установлено, что плоскость тектонического нарушения на участке полигона и в области возможного влияния захоронения представляет собой глинистый экран. Это следовало из различия естественных уровней подземных вод горизонтов опущенного и приподнятого блоков (до 43 м), данных наблюдений при опытно-фильтрационных работах. В последующем этот вывод был подтвержден материалами гелиевой съемки, результатами эксплуатации полигона. Глинистый экран образован залегающими под большими углами наклонно (крутопадающими) глинистыми слоями, которые ввиду пластичности глин не были нарушены, а только перемяты, в то время как песчаные породы были разрушены и затерты.

Участок возможной взаимосвязи горизонтов опущенного и приподнятого блоков находится в 3—4 км к северу от центра полигона захоронения.

В соответствии с результатами геолого-разведочных работ дно и борта впадины сложены метаморфизованными гнейсами, которые перекрываются пестроцветными глинами — остатками триас-юрской коры выветривания. Юрские образования представлены переслаивающейся толщей песчаных и глинистых пород, в пределах которых выделяются пластообразно-залегающие проницаемые песчаные породы, обладающие коллекторскими свойствами, и слабопроницаемые глинистые породы, обладающие водоупорными свойствами. В толще юрских образований выделяются нижний (макаровская свита) и средний (итатская свита) отделы. В верхней части разреза залегают маломощные четвертичные образования. На рис. 26 приведена стратиграфическая колонка участка полигона «Северный».

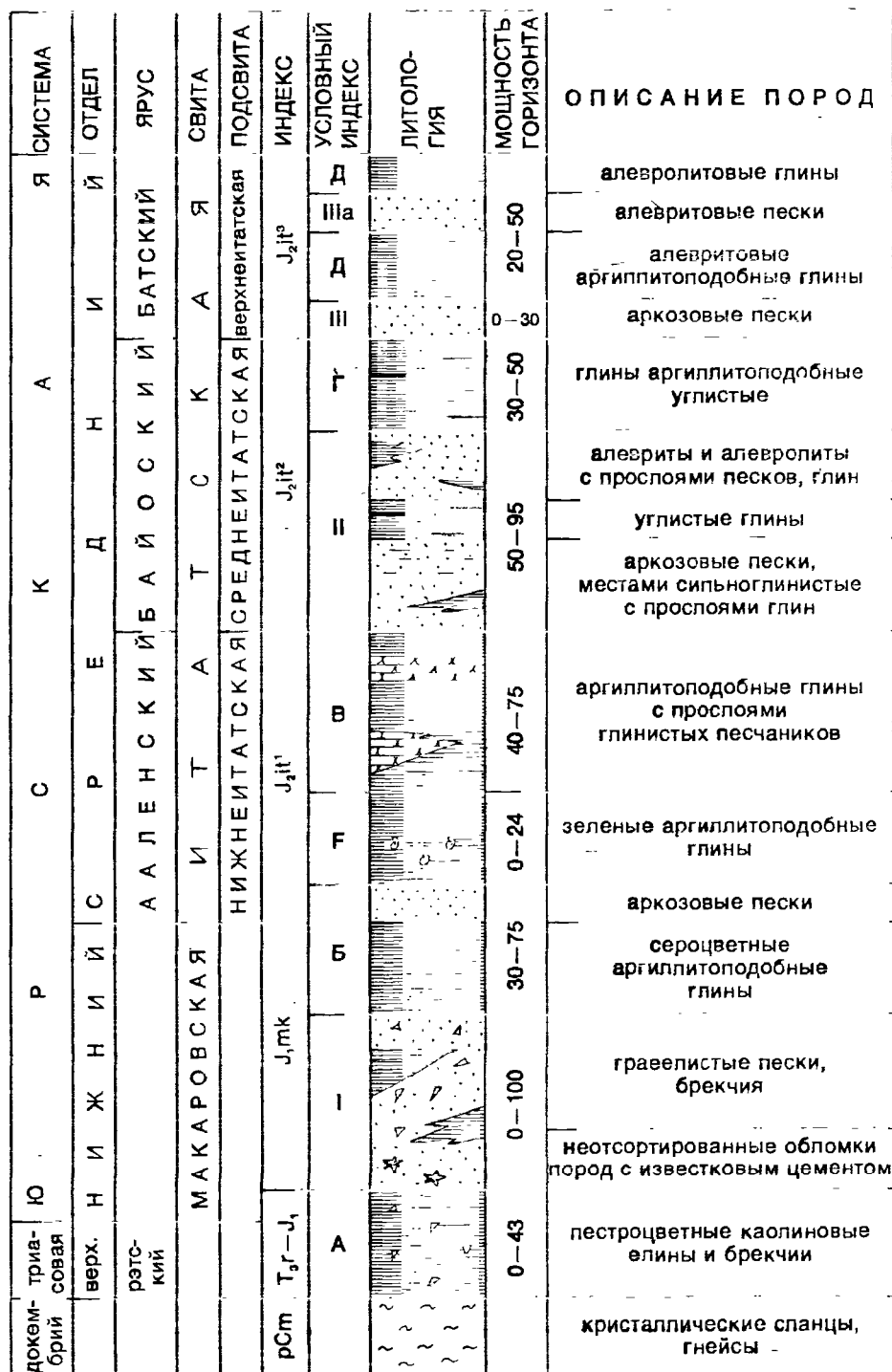


Рис. 26. Схема стратиграфического расчленения дочетвертичных отложений в районе ГХК.

В составе водоносного комплекса юрских отложений выделяются I, II, III песчаные горизонты (снизу вверх), разделенные глинистыми слабопроницаемыми горизонтами Б, В, Г и Д. Горизонт I подстилается слабопроницаемыми отложениями коры выветривания (горизонт А).

Горизонты I и II, залегающие в центральной части полигона в интервале глубин 370–465 м и 180–280 м соответственно, рекомендованы в качестве пластов-коллекторов для захоронения отходов. В составе II горизонта выделяются 2 пачки проницаемых пород, разделенные глинистой пачкой. Для захоронения низкоактивных отходов используется нижняя проницаемая пачка, верхняя пачка выполняет роль буферного горизонта.

Пласты-коллекторы сложены среднезернистыми песками и слабосцементированными песчаниками и характеризуются следующим составом: кварц—70–80%, калиевые или натриевые полевые шпаты, ортоклаз, микроклин, плагиоклаз—5–15%, минералы группы слюд и гидрослюд—10%, глинистые минералы—3–5%. В пределах коллекторских горизонтов выделяются подчиненные прослои глинистых пород. Фильтрационные и емкостные свойства I и II горизонтов, используемых для захоронения отходов, приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Фильтрационные и емкостные свойства пластов-коллекторов
полигона «Северный» ГХК**

№ п/п	Параметры	Ед. изм.	I гор.	II гор. (нижняя часть)
1	2	3	4	5
1.	Глубина залегания	м	355–500	180–280
2.	Мощность	»	55–85	25–45
3.	Эффективная мощность	»	25–35	23–45
4.	Общая пористость	—	0,2–0,25	0,3
5.	Эффективная пористость	—	0,07	0,08–0,12
6.	Водопроводимость	м ² /сут	5–40	20–80
7.	Коэффициент фильтрации	м/сут	0,3–1,6	0,1–2,2
8.	Коэффициент пьезопроводности	м ² /сут	$1,6 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^5$
9.	Напор над кровлей	м	360–370	62–147

Слабопроницаемые горизонты сложены различными глинистыми породами: аргилито-подобными и «жирными» глинами (горизонт Б), алевролитами, углистыми глинами (в верхней части разреза), переслаиванием различных глин с подчиненными прослоями песков, иногда известковистых. Глинистые горизонты распространены повсеместно в пределах области возможного влияния захоронения и выклиниваются в восточном и южном направлениях на бортах впадины.

В гидрогеологическом отношении район полигона «Северный» может рассматриваться как малый артезианский бассейн, находящийся в опущенном блоке и открытый к Чулымскому артезианскому бассейну с севера. В районе выделяются водоносные комплексы четвертичных и юрских отложений, комплекс метаморфических и изверженных пород докембрия.

Четвертичные образования и скальные породы фундамента обводнены слабо и не представляют интерес для использования в каких-либо практических целях.

Основными водоносными горизонтами юрских отложений являются I горизонт нижнемакаровской подсвиты и II горизонт среднеитатской подсвиты, сложенные песками с прослоями глин. III горизонт обводнен меньше и распространен не повсеместно.

Область питания I горизонта находится в 7 км к югу от полигона «Северный», основной областью разгрузки является долина р. Кан на расстоянии 12–14 км от полигона. Естественная скорость движения подземных вод характеризуется значениями 5–6 м/год, направление потока с юга на север, уклон пьезометрической поверхности 0,003. Область питания II горизонта расположена в 4–5 км к югу от полигона, область разгрузки совпадает с областью разгрузки I горизонта, частичная разгрузка осуществляется в долину р. Тель вне области влияния захоронения отходов.

Пласты-коллекторы содержат воды с малым содержанием (до 0,3 г/л), пьезометрические напоры над кровлей составляют 360–370 м для I горизонта и 62–147 м для II горизонта. Различие естественных напоров подземных вод горизонта на участке полигона захоронения составляет 2–3 м.

По данным специальных геофизических исследований, I и II горизонты характеризуются несколько большей вертикальной фильтрационной неоднородностью, чем коллекторские горизонты СХК, однако выделенные интервалы максимальной фильтрации не прослеживаются по различным скважинам, что позволяет ожидать более или менее равномерное распространение отходов в пласте-коллекторе.

Естественная сейсмичность района ниже 6 баллов.

Результаты геолого-разведочных работ в районе ГХК с учетом опыта экспериментального захоронения отходов на СХК позволили достаточно уверенно рекомендовать создание полигона захоронения РАО. При этом учитывались следующие факторы:

- достаточная емкость коллекторских горизонтов и изолированность глинистыми слоями друг от друга, вышележащего III горизонта и поверхности;

- ограниченное площадное развитие комплекса осадочных пород, используемого для захоронения отходов, и наличие с запада тектонического экрана, изолирующего пласты-коллекторы от приподнятого блока, проницаемых пород в направлении долины р. Енисей;

- низкие скорости естественного движения подземных вод в северном и северо-восточном направлении. Сорбционная задержка нуклидов породами при низком солесодержании подземных вод ограничивают распространение отходов в заранее устанавливаемых границах геологической среды;

- благодаря синклиналильному характеру залегания коллекторских горизонтов может происходить дополнительная локализация отходов в наиболее погруженных участках структуры в пределах и непосредственной близости полигона захоронения. Это связано с большей плотностью отходов относительно подземных вод;

- низкая обводненность верхней части разреза в районе полигона захоронения обуславливает бесперспективность использования III горизонта для водоснабжения. Ущерб естественным ресурсам пресных подземных вод в связи с захоронением минимален;

- результаты геофизических и гидродинамических исследований, анализ геолого-геофизической документации бурения скважин не позволили выявить признаки тектонических нарушений, которые являлись бы каналами связи между коллекторскими и III горизонтом, поверхностными и грунтовыми водами. Экранирующая роль тектонического нарушения (позднее получившего название «правобережного») была установлена специальными исследованиями;

- выводы о геологических условиях участка захоронения базируются на комплексных и детальных исследованиях, сопровождавшихся бурением и исследованием большого числа скважин (см. р. 3.2), что позволяет считать полученные материалы весьма достоверными.

Вместе с тем ограниченное площадное развитие коллекторских горизонтов, и особенно I горизонта, снижение фильтрационных свойств в направлении бортов структуры затрудняет

перераспределение по площади пластовых давлений, развиваемых в результате захоронения отходов, и может привести к необходимости применения довольно больших давлений нагнетания, что скажется отрицательно на равномерности заполнения пласта-коллектора отходами.

В связи с этим было выдвинуто предположение об осуществлении одновременно с нагнетанием отходов разгрузки пласта-коллектора путем откачки подземных вод через скважины, удаленные на соответствующее расстояние от нагнетательных. Предварительные расчеты и опытно-фильтрационные работы на стадии геолого-разведочных работ подтвердили принципиальную возможность такой схемы захоронения отходов. На стадии обоснования и проектирования были определены оптимальное расположение и режимы эксплуатации нагнетательных и разгрузочных скважин.

Объемы РАО, предполагавшиеся направлять на захоронение, были существенно меньшими, чем для условий СХК. Имелись основания предполагать о распространении отходов в пластах-коллекторах на площади не более 6 кв. км для периода эксплуатации 30 лет, их последующей локализации в течение, как минимум, 1 тыс. лет в пределах границ санитарно-защитной зоны, горного отвода недр. Эти обстоятельства являлись значимым фактором для решения в пользу осуществления захоронения жидких РАО.

Полигон захоронения «Северный»

Полигон захоронения жидких РАО ГХК «Северный» расположен на расстоянии ~12 км от основных производств. Нагнетательные скважины расположены в виде линейных рядов, причем ряды скважины I и II горизонтов совмещены. Расстояния между скважинами каждого горизонта принято ~200 м. Имеется 7 нагнетательных скважин I горизонта и 4 нагнетательные скважины II горизонта. Разгрузочные скважины I горизонта расположены в 1 км от нагнетательных скважин — в направлении, противоположном естественному движению подземных вод. Разгрузочные скважины II горизонта расположены в 1,5 км к северу. В связи с уменьшением объемов захоронения нетехнологических отходов эти скважины в последующем не эксплуатировались и использовались как наблюдательные (рис. 27).

Между нагнетательными и разгрузочными контурами расположены 46 наблюдательных скважин для контроля состояния I, II и III горизонтов, 42 наблюдательных скважины имеются за пределами собственно полигона захоронения. В состав наблюдательных были включены разведочные скважины после

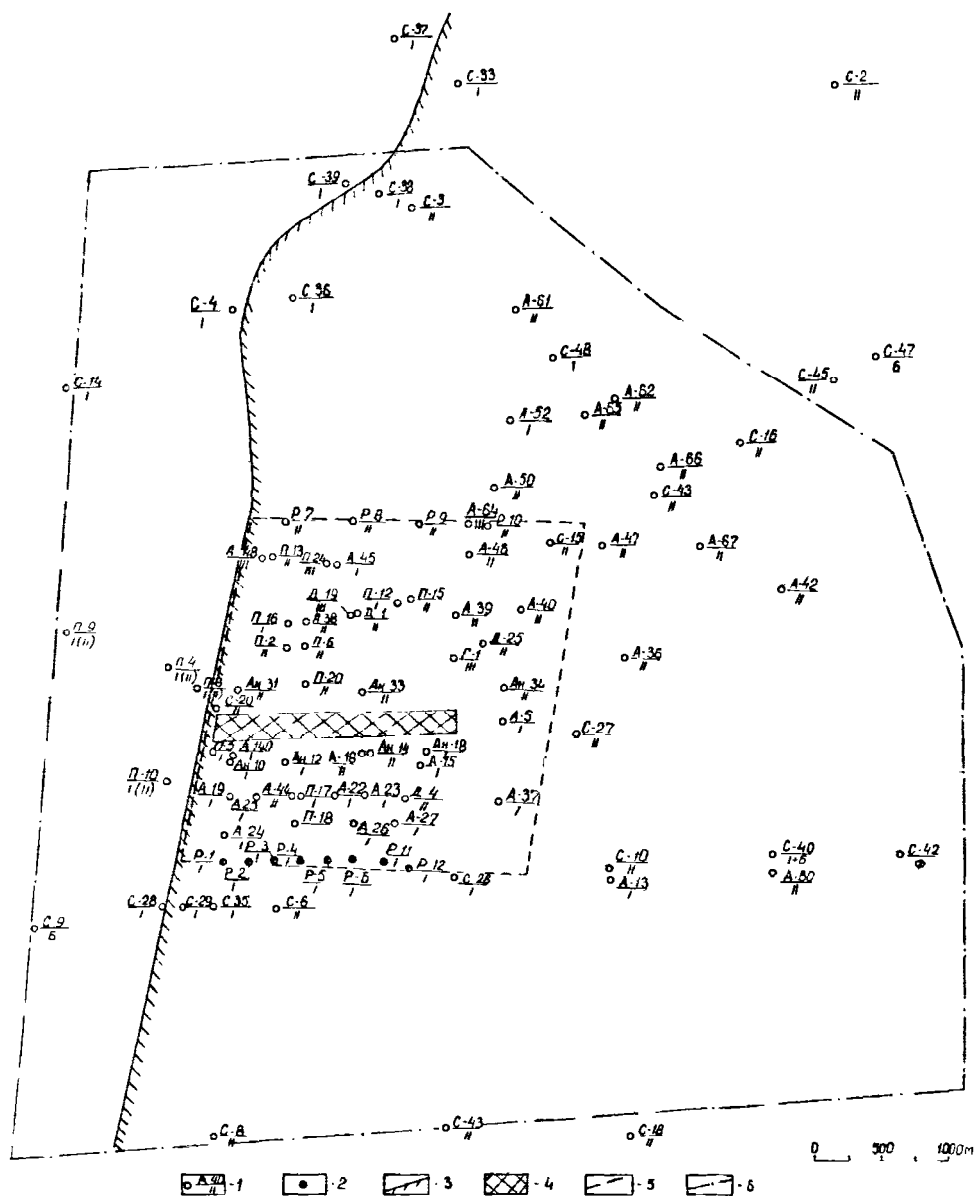


Рис. 27. Схема расположения наблюдательных скважин в районе полигона «Северный»

1—эксплуатационные скважины: в числителе—индекс и номер, в знаменателе—горизонт, на который оборудована скважина; 2—разгрузочные скважины; 3—тектонический экран; 4—магнетателный контур; 5—граница полигона; 6—граница горного отвода недр.

проверки их технического состояния. Часть наблюдательных скважин расположена в непосредственной близости от нагнетательных. В составе полигона предусмотрены также резервные нагнетательные скважины, которые первоначально используются в качестве наблюдательных и в последующем переоборудуются и переводятся в разряд нагнетательных (скважины типа АН). К 1992 г. в эксплуатацию было введено 3 резервных нагнетательных скважины.

В соответствии с проектом в пласт-коллектор I горизонта с 1967 г. осуществляется захоронение технологических среднеактивных отходов при расходах до 300 куб. м в сутки и давлениях нагнетания до 1,2 МПа. Разгрузка осуществляется с дебитом до 300 куб. м в сутки. По результатам гидродинамического контроля в наблюдательных скважинах фиксируются закономерные изменения напоров, связанные с нагнетанием отходов и откачкой подземных вод: купол репрессии в районе нагнетательного контура и воронка депрессии в районе разгрузочного контура (рис. 28). Как показывают расчеты, давления нагнетания отходов без разгрузки пласта-коллектора составили бы до 5,0 МПа. Режимы работы нагнетательных и разгрузочных скважин, схемы их включения устанавливались исходя из условия обеспечения равномерного заполнения пласта-коллектора I горизонта на основе анализа контрольных наблюдений.

В состав удаляемых технологических отходов входят соли натрия, кремнекислота, ионы некоторых металлов. Общее солесодержание составляло до 240 г/л, удельная активность не превышала 10^{-2} Ки/л. Радионуклидный состав аналогичен отходам СХК и представлен стронцием, цезием, рутением, церием и некоторыми другими короткоживущими нуклидами.

Появление компонентов отходов в районе наблюдательных скважин фиксируется увеличением общего солесодержания и содержаний нитрат-ионов, трития, а в последующем и удельной активности, повышением гамма-поля в наиболее проницаемых интервалах пласта-коллектора. Повышенные значения гамма-поля фиксируются также и ниже подошвы пласта-коллектора I горизонта в отстойниках наблюдательных скважин против слабопроницаемого горизонта А, причем возникновение подобных гамма-аномалий совпадает с появлением нитратов, но иногда опережает увеличение активности жидкости в фильтровой зоне скважины (например, скв. П-II).

Была установлена причина этого явления — накопление в отстойнике скважины выносимых потоком пластовой жидкости в ствол скважины мелкодисперсных взвешенных частиц пелитовой и глинистой составляющей пород, содержащих нуклиды в виде сорбата. В отбираемых одновременно пробах

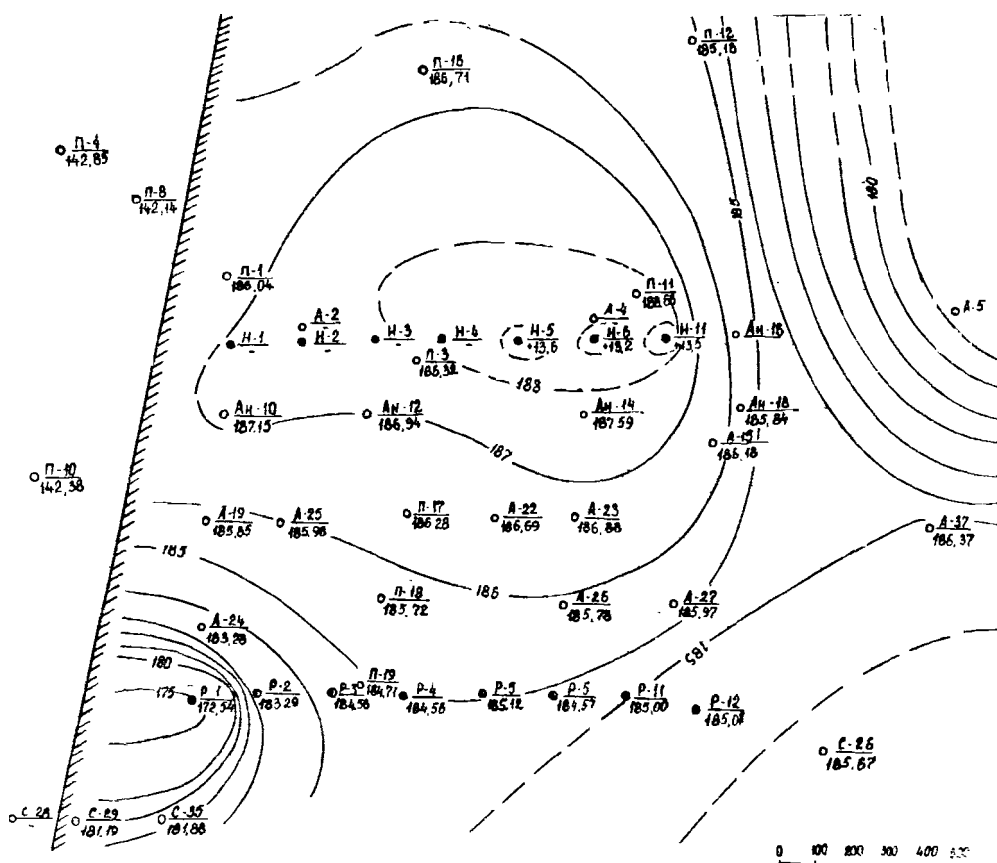


Рис. 28. Схема гидроизопьез I горизонта полигона «Северный» при нагнетании РАО в скв. Н-5, -6, -11 и разгрузки из скв. Р-1

В знаменателе обозначения скважин — абсолютная отметка подземных вод, м.

жидкости из фильтровой зоны скважины радиоактивные нуклиды находятся в содержаниях ниже допустимых (ДКБ) и пороговых, отстой отбираемых проб не анализируется ввиду его незначительного объема. В образующемся за длительный период времени осадке в скважине содержания нуклидов выше, чем в скважинной жидкости. Это явление отмечается в наблюдательных скважинах с фильтровой зоной вблизи нагнетательного контура и позволяет сделать предположение о миграции нуклидов с мелкодисперсными частицами в поровом пространстве пласта-коллектора. Очевидно, что подобный массоперенос будет играть значимую роль при достаточно высоких скоростях движения жидкости больше критических значений, ниже которых мелкодисперсные частицы не двига-

ются и остаются в породах. Такие условия на полигонах захоронения имеют место в период нагнетания отходов и вблизи нагнетательного контура. Скорость такого массопереноса будет ниже, чем растворенных в воде веществ.

Интервалы заполнения пласта-коллектора отходами отмечаются также увеличением температуры вследствие выделения энергии при радиоактивном распаде, изменения температуры в результате нагнетания отходов, температура которых отлична от пластовой, а в отдельных случаях — вследствие внутрипластовых перетоков в пределах фильтровых зон наблюдательных скважин между слоями пласта-коллектора различной проницаемости.

На рис. 29 в качестве примера приведен характерный график изменения содержания нитратов и удельной активности жидкости в фильтровой зоне скважины при прохождении через ее сечение границы раздела пластовые воды — отходы. Скважина расположена на расстоянии 200 м от нагнетательной Н-6, возрастание содержаний определяемых показателей после нагнетания 120 тыс куб. м отходов обусловлено прохождением зоны дисперсии отходов.

На рис. 30 приведены характерные диаграммы гамма-каротажа и термометрии скважины, в породах прифильтровой зоны которых присутствуют отходы. Отмечается заполнение отходами отдельных слоев проницаемых пород пласта-коллектора, что наиболее отчетливо проявляется в геофизической («глухой») скважине А-4, внутреннее пространство которой не сообщается с пластом-коллектором. Слои пород пониженной проницаемости, разделяющие проницаемые слои заполненные отходами, не содержат компонентов отходов, несмотря на длительный контакт с ними. Не отмечено проникновение компонентов отходов в перекрывающие и подстилающие пласт-коллектор слабопроницаемые глинистые горизонты.

По результатам обработки наблюдений прохождения фронта отходов через скважины А-2, -4, -58, П-3 были уточнены фильтрационные и дисперсионные характеристики коллекторских горизонтов, схема их заполнения отходами, которая представляется следующей.

Распределение отходов в слоистом пласте-коллекторе зависит от проницаемости слоев, которая в свою очередь определяется их фильтрационными свойствами и степенью коагуляции пород глинистым раствором при бурении скважины и отходами при их нагнетании.

Первоначально происходит заполнение слоев наибольшей проницаемости и опережающее распространение по ним отходов, что достаточно четко фиксируется по данным гамма-

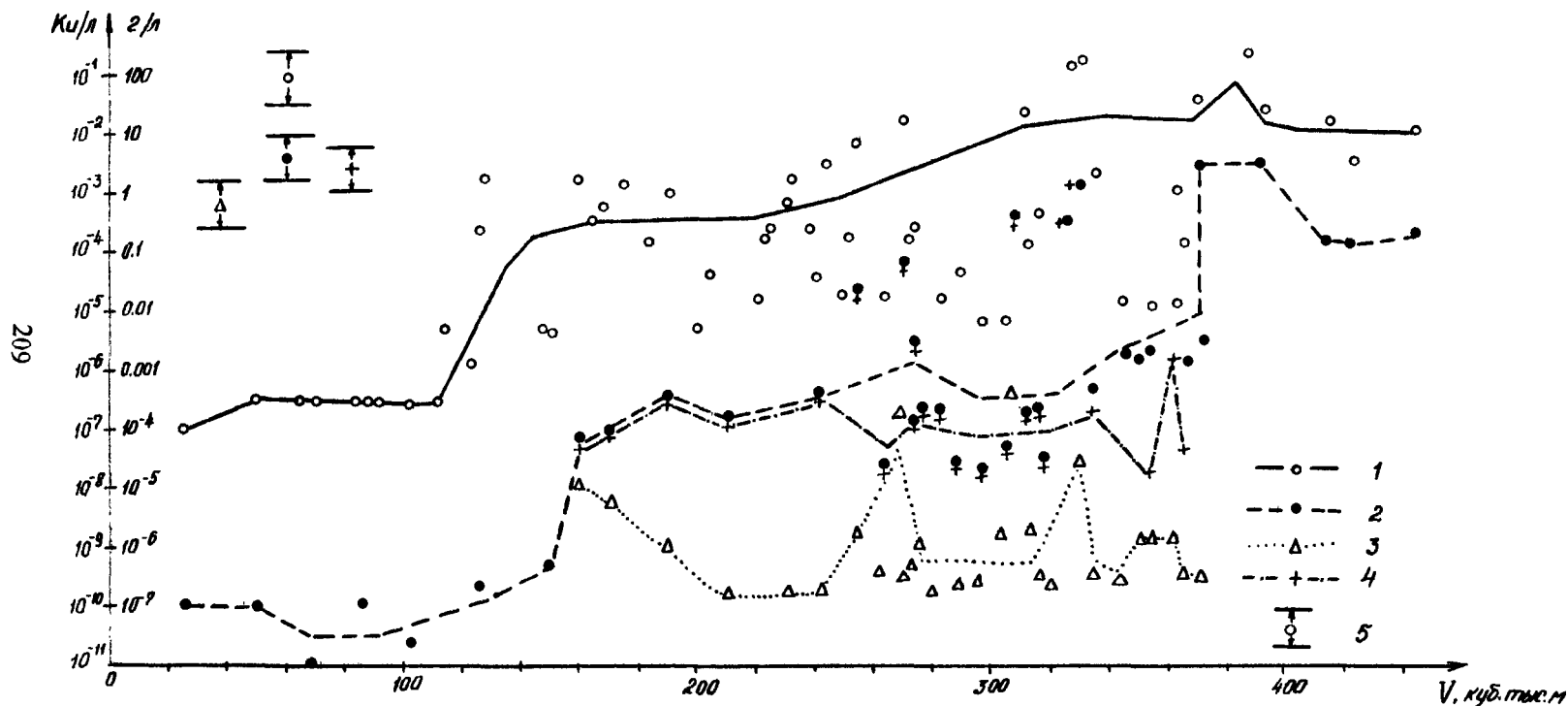


Рис. 29. Изменение содержаний компонентов отходов в пластовой жидкости скважины АН-14 полигона «Северный» в зависимости от объемов нагнетания среднеактивных отходов

1 — $NaNO_3$, г/л; 2 — общая активность, Ки/л; 3 — стронций-90; 4 — рутений-106; 5 — пределы содержаний компонентов в отходах.

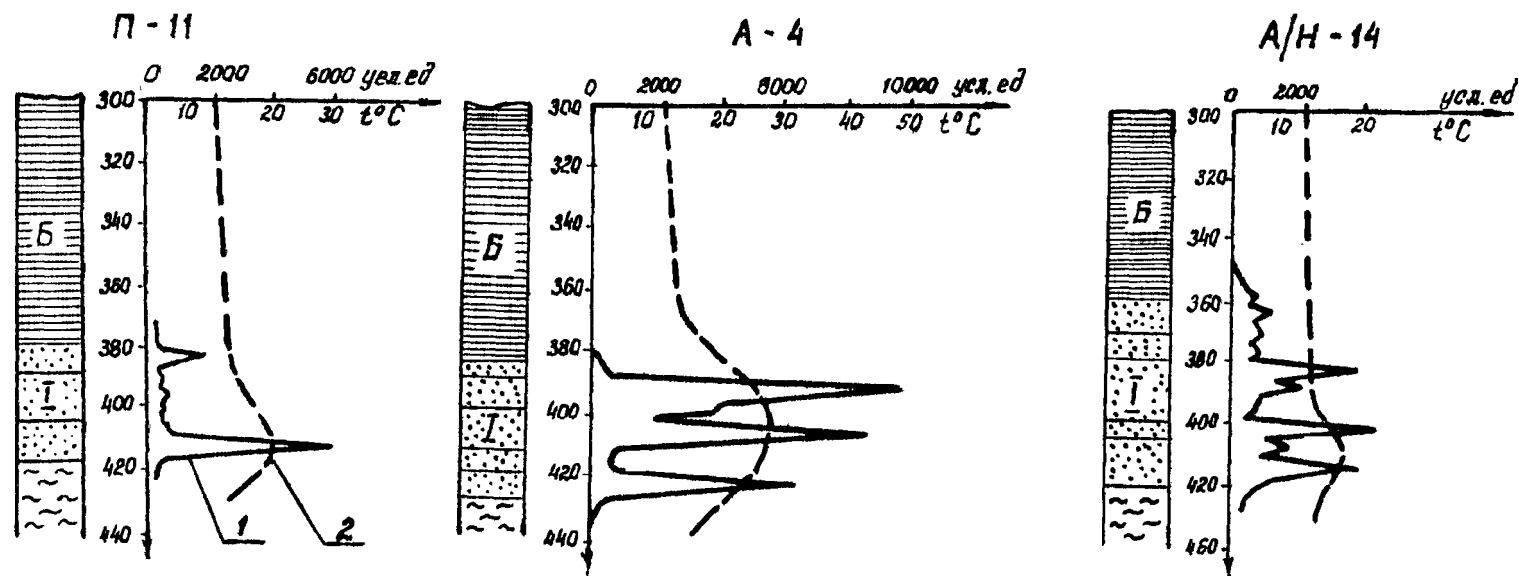


Рис. 30 Результаты геофизического контроля наблюдательных скважин полигона захоронения РАО «Северный»
1 — гамма-каротаж; 2 — термометрия

каротажа геофизических скважин, расположенных вблизи нагнетательного контура.

Как показывает анализ геологических материалов и данных контроля, эти слои в песчано-глинистых разрезах ГХК и СХК прослеживаются на расстоянии десятков и первой сотни метров и затем выклиниваются или замещаются на менее проницаемые. Аналогичная картина характерна и для слоев пониженной проницаемости, что в целом приводит к перераспределению отходов по мощности пласта-коллектора и увеличению его емкости.

Одновременно происходит кольматация и снижение проницаемости интервалов (слоев), в наибольшей степени поглощающих отходы содержащимися в них взвесями и в результате процессов осадкообразования. Увеличивается поглощение отходов интервалами разреза, которые ранее принимали меньше отходов и поэтому не были закольматированы. В результате происходит выравнивание распределения отходов по мощности пласта-коллектора, снижение скорости продвижения осредненного фронта отходов по мере удаления от нагнетательного контура. Определенная часть проницаемых слоев отходами не заполняется. Суммарная заполняемая отходами мощность пласта-коллектора несколько ниже эффективной, определенной при геолого-разведочных работах, что, однако, не сказывается на удельной емкости пласта ввиду большей действующей пористости, увеличивающейся при длительном контакте отходов с породами.

Интенсивное распространение отходов по маломощным зонам может происходить при высоких давлениях нагнетания в режиме гидроразрыва пласта.

Контур распространения отходов в пласте-коллекторе устанавливаются на основе расчетов и моделирования с учетом данных контрольных наблюдений о полях давлений, содержаниях компонентов и геофизических характеристиках. На рис. 31 приведен контур отходов, построенный на основе определений компонентов отходов, главным образом нитратов, в отбираемых пробах жидкости из наблюдательных скважин.

В 1974 г. было отмечено преимущественное распространение отходов в направлении скважины А-23. Для выравнивания контура отходов были отключены восточные скважины разгрузочного контура и включены западные скважины. Контур отходов был выровнен. Распространение отходов в пласте-коллекторе в целом соответствует прогнозам.

В состав определяемых показателей входит третий. На рис. 32 приведены результаты тритиевого контроля, который

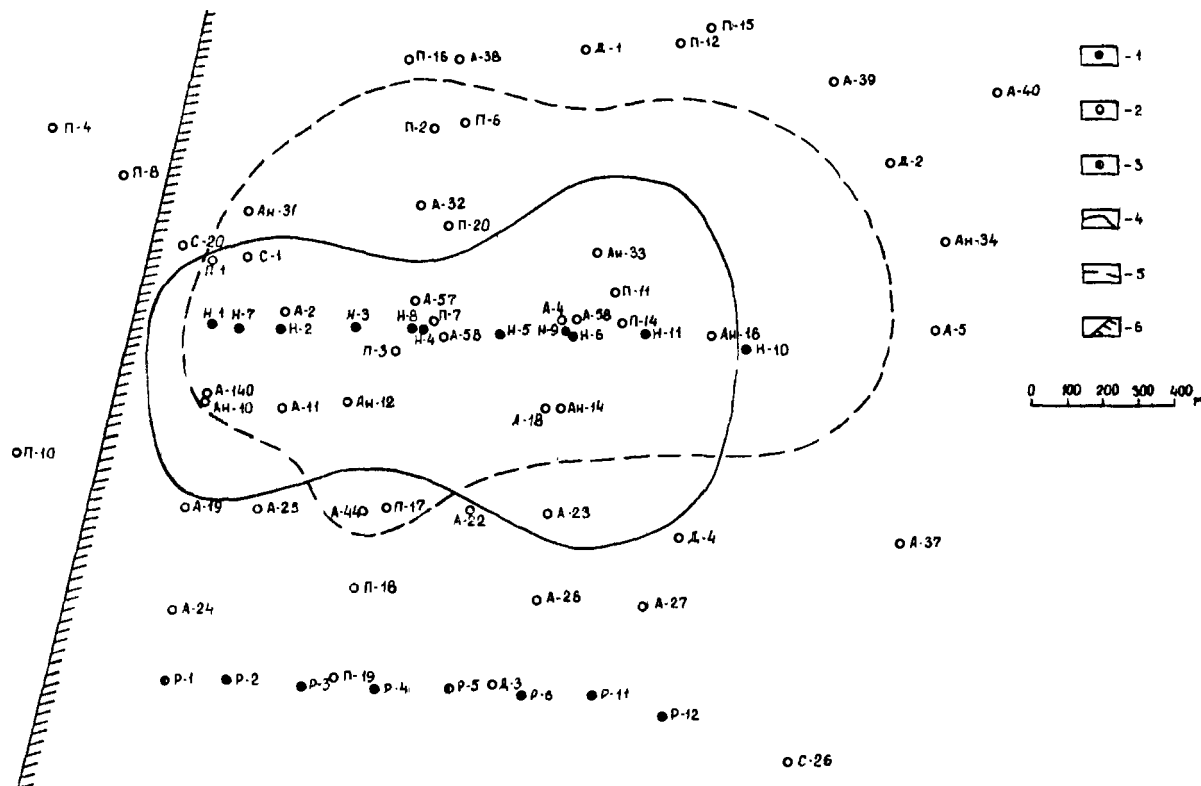


Рис. 31 Схема расположения скважин и контуров распространения отходов полигона «Северный»

1 — нагнетательные скважины; 2 — наблюдательные скважины; 3 — разгрузочные скважины; 4, 5 — контуры средне- и низкоактивных отходов по нерадиоактивным компонентам отходов; 6 — тектонический экран.

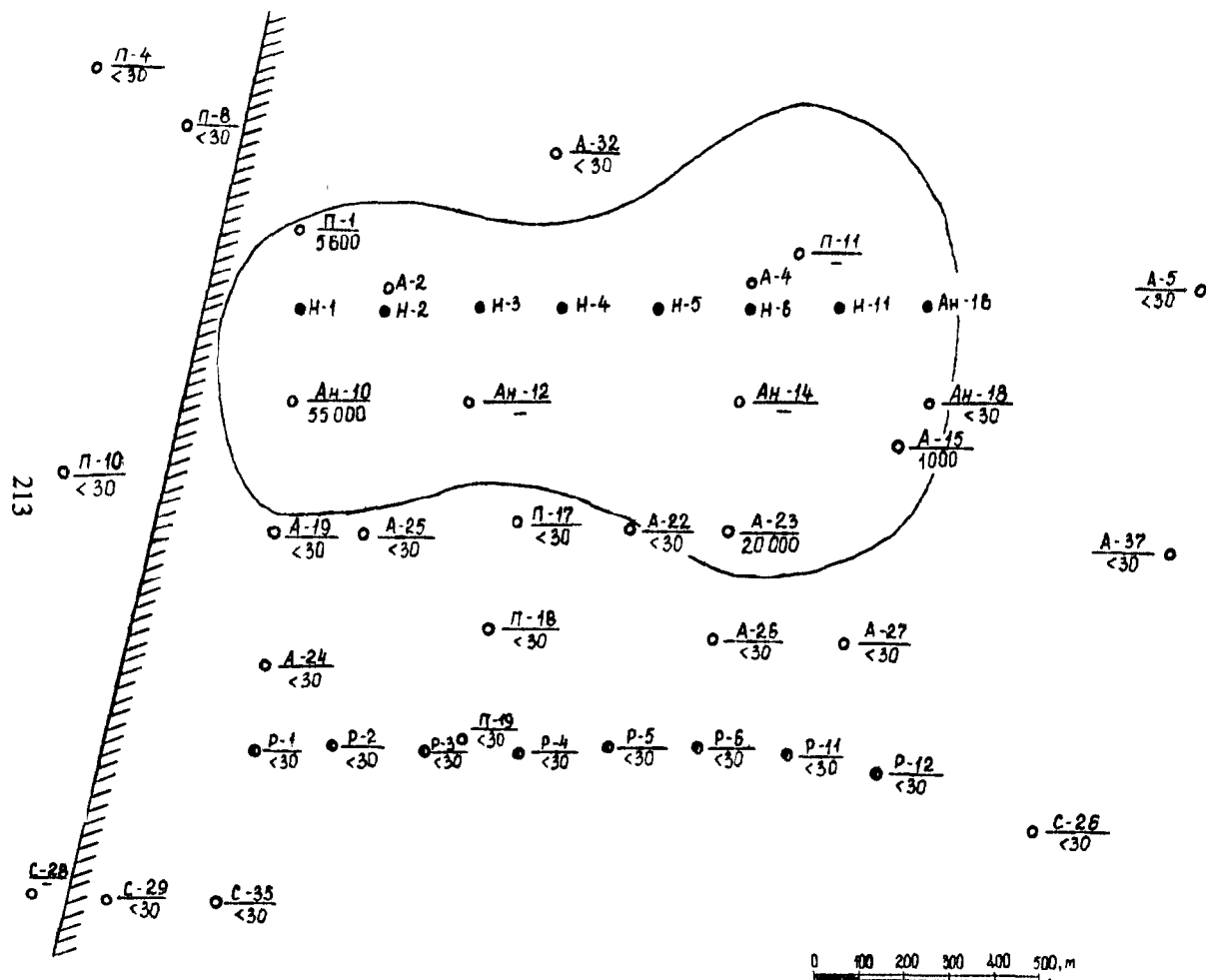


Рис. 32, а Результаты определения трития в скважинах полигона «Северный»

а—I горизонт; б—II горизонт.

Условные обозначения см. на рис. 31

В знаменателе обозначения скважин—содержание трития, Бк/л.

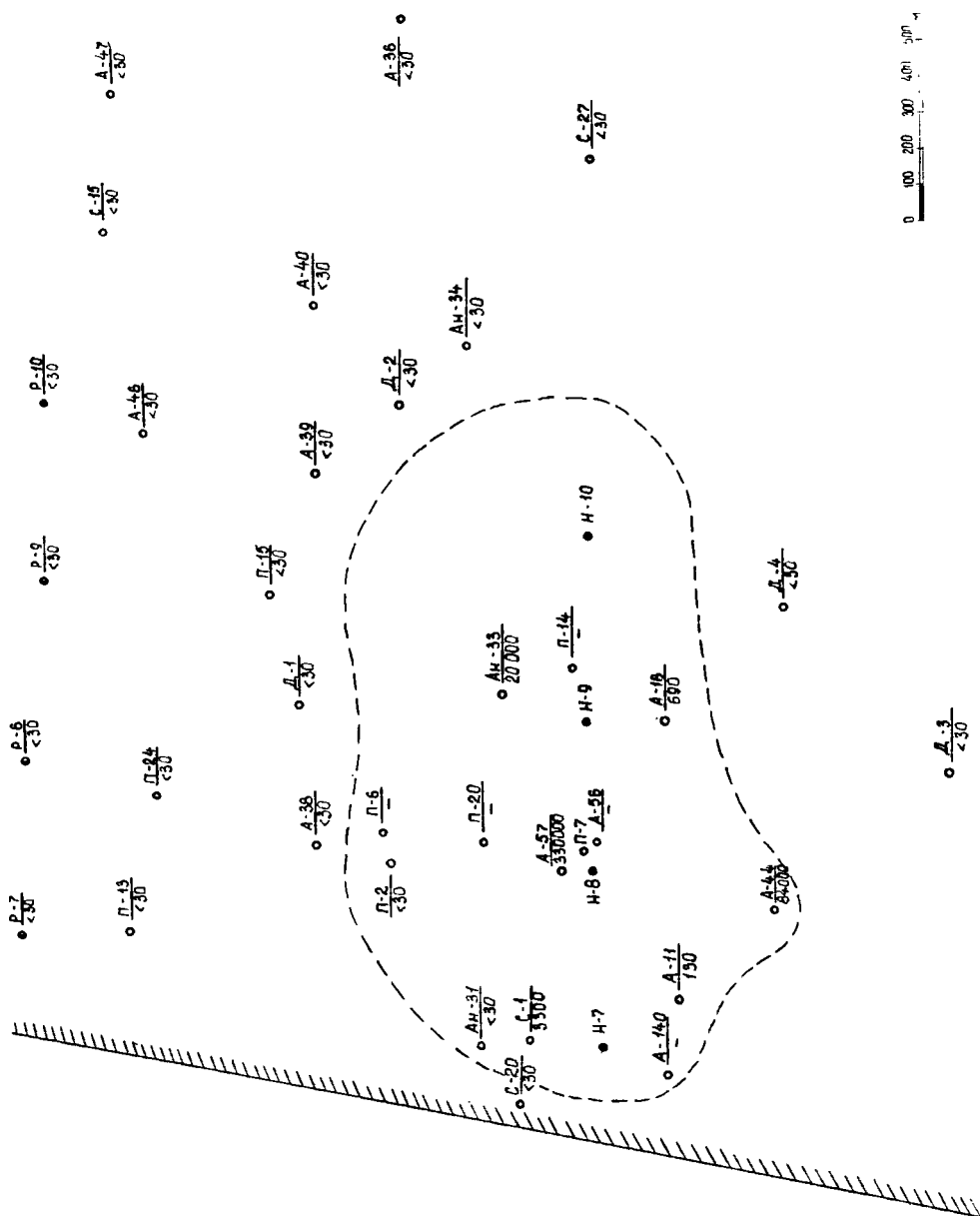


Рис. 32.6

не отмечает повышенных содержаний трития за пределами установленного контура отходов. Методика тритиевого контроля была разработана Л. И. Геденовым (НПО Радиевый институт).

Выполняется контроль состава откачиваемых вод из разгрузочных скважин, удельная активность вод контролируется постоянно.

С 1972 г. на полигоне «Северный» осуществляется захоронение отходов повышенной активности ($0,1 - 5$ Ки/л), условно называемых высокоактивными. Захоронение осуществляется этапами, 1—2 раза в год и реже, объем захоронения на каждом этапе (порции) составляет 1—2 тыс. куб. м.

Проводится предварительная подготовка пласта-коллектора путем нагнетания слабокислых растворов для снижения накопления нуклидов в ближней зоне нагнетательной скважины. Отходы удаляются в слабокислой среде ($pH\ 1 \div 2$), перед нагнетанием проводится предварительная подготовка отходов, включающая перевод слаборастворимых соединений в состав растворимых комплексов.

Захоронение отходов осуществляется в 2 скважины, расположенные в общем ряду скважин на I горизонт. Удаление высокоактивных отходов осуществляется в режиме свободного налива или при минимальных давлениях на устье скважины, пьезометрическая поверхность подземных вод в районе скважин практически не изменяется.

Контроль распределения отходов в пласте-коллекторе и процессов разогрева пород осуществляется путем проведения геофизических измерений в измерительных колоннах нагнетательных скважин и в скважине А-2 («глухая»), расположенной от нагнетательной на расстоянии 50 м. На рис. 33 приведены результаты геофизического контроля. Отмечается заполнение проницаемых слоев пласта-коллектора отходами. Температура разогрева пород в целом соответствует прогнозам.

Как и при захоронении отходов СХК, после удаления высокоактивных отходов в пласте-коллекторе происходит уменьшение их кислотности вследствие взаимодействия с карбонатной составляющей пород, радиационно-химических процессов и повышенных температур, смешения с фильтратом щелочных среднеактивных отходов или контакта с породами, в поровом пространстве которых находились среднеактивные отходы. Это вызывает образование слаборастворимых соединений, захватывающих и соосаждающих нуклиды. Предполагается переход в твердую фазу и закрепление 95—98% нуклидов. Результаты наблюдений в определенной степени подтверждают это предположение.

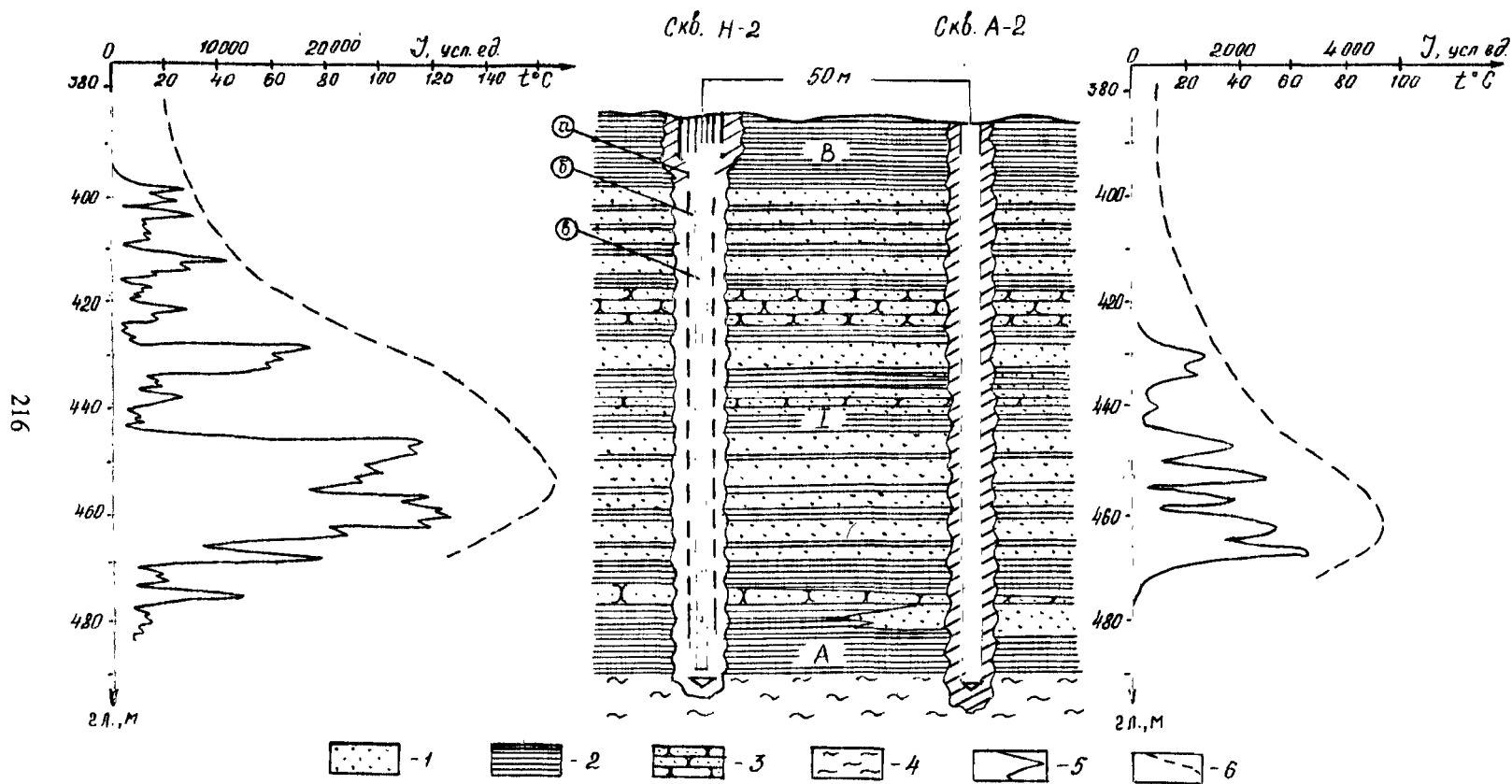


Рис. 33 Геолого-геофизический разрез по линии скважин Н-2 ÷ А-2

1—проницаемые песчаные породы; 2—слабопроницаемые глинистые породы; 3—песчаники; 4—породы фундамента; 5—график гамма-каротажа; 6—график термометрии; а—эксплуатационная колонна; б—лифтовая колонна; в—измерительная колонна.

Площадь распространения высокоактивных отходов в несколько десятков раз ниже, чем среднеактивных, хотя на долю первых приходится большая часть общего количества нуклидов.

В пласт-коллектор II горизонта полигона «Северный» с 1968 г. осуществляется удаление нетехнологических низкоактивных отходов с расходом до 600 куб. м в сутки и при давлениях до 2,0 МПа. Разгрузка пласта-коллектора не проводится в связи с перераспределением создаваемых давлений за сравнительно небольшие промежутки времени. Нагнетание отходов сопровождается закономерным повышением уровней II горизонта.

В составе отходов соли, детергенты. Соле содержание отходов до 10 г/л. Радионуклидный состав в целом аналогичен технологическими отходами. Присутствие отходов в районе наблюдательной скважины отмечается увеличением в пластовой жидкости общего соле содержания, нитрат- и сульфат-ионов. Распространение радиоактивных нуклидов существенно отстает от химических загрязнений за исключением случаев нагнетания отходов при повышенных давлениях и расходах (см. ниже). В скважине А-57, расположенной в 85 м от нагнетательной, содержания нерадиоактивных компонентов близки к содержаниям в отходах, в то же время радиоактивные нуклиды отмечены в содержаниях на 2—3 порядка меньше.

На рис. 31 приведена схема распространения компонентов отходов в пласте-коллекторе II горизонта по данным 1992 г. Контуры отходов определены на основании контрольных наблюдений и расчетов. Общий объем удаления низкоактивных нетехнологических во II горизонт составил 2,0 млн. куб. м. На рис. 326 приведены результаты тритиевого контроля в скважинах II горизонта. На рис. 34 приведен схематический разрез по району полигона с указанием контуров распространения отходов.

Контроль окружающей среды и оценка безопасности захоронения РАО

Особенностью глубинного захоронения жидких РАО ГХК, в отличие от условий СХК, является отсутствие других водопользователей в области возможного влияния захоронения и в непосредственной близости от нее, малая перспективность верхних водоносных горизонтов как источников водоснабжения. Это обстоятельство упрощает организацию контроля подземных вод. Тем не менее в районе полигона «Северный» была создана сеть контрольных скважин в пределах и за пределами полигонов захоронения (рис. 27).

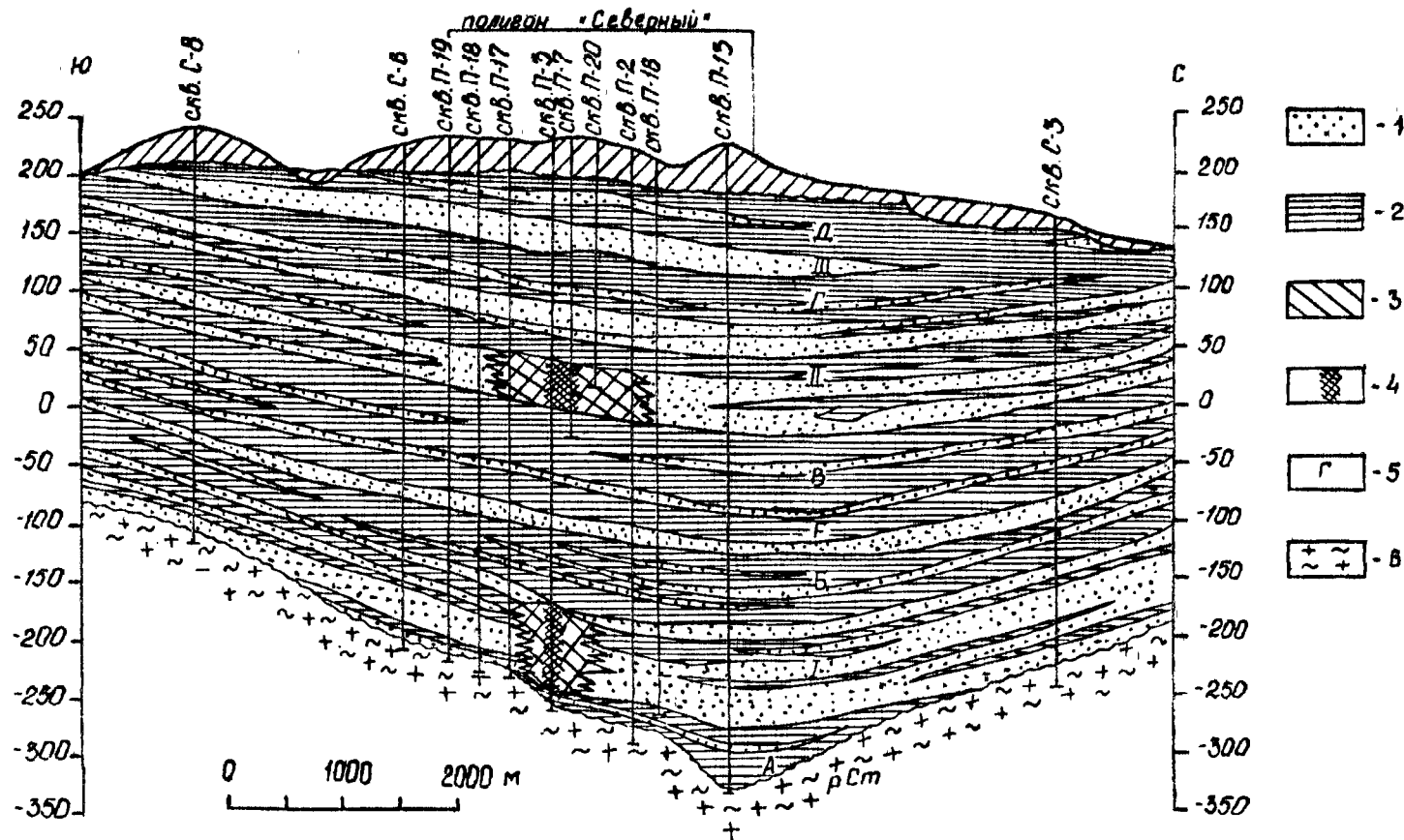


Рис. 34 Схематический разрез по полигону «Северный»

1—проницаемые песчано-глинистые породы; 2—слабопроницаемые глинистые породы; 3—область распространения отходов; 4—участки максимального концентрирования пуклидов; 5—условные индексы горизонтов; 6—отложения докембрия

Существование правобережного тектонического нарушения, находящегося в непосредственной близости нагнетательных скважин полигона захоронения и области развития куполов репрессии, контактирование водоносных комплексов приподнятого блока тектонического нарушения в западном направлении с долиной р. Енисей вызвали необходимость усиления контроля в области тектонического нарушения с целью обеспечения безопасности захоронения и предупреждения загрязнения окружающей среды.

Как уже упоминалось в предыдущих разделах, при проведении геолого-разведочных работ были выполнены специальные исследования тектонического нарушения, позволившие установить его экранирующую роль в области возможного влияния захоронения. Наблюдения за пьезометрической поверхностью подземных вод при эксплуатации полигона (скв. П-1, 4, 5, 10, С-1, 20), подтвердили изолирующую способность тектонического нарушения. В связи с выдвигаемой в последние годы гипотезой об активизации современных тектонических процессов и опасениями вызванной сейсмичности в зонах тектонических нарушений на полигоне «Северный» ОКБ ИФЗ РАН была создана постоянно действующая система сейсмического контроля (КАГК-Д-1, ПОИСК), включавшая 12 измерительных периферийных пунктов с регистрацией в каждом пункте до трех компонентов сейсмического поля в расширенной полосе частот, центральный пункт с аппаратурой для цифровой и аналоговой регистрации сигналов, кабельные линии связи. На рис. 35 приведена схема расположения периферийных пунктов.

По результатам многолетних наблюдений не были обнаружены признаки вызванной сейсмичности, связанной с нагнетанием отходов, хотя неоднократно отмечались сейсмические события, связанные с удаленными землетрясениями.

С целью установления возможных геодинамических явлений были проведены высокоточные геодезические наблюдения. Схемы реперов и маршрутов наблюдений приведены на рис. 35. По полученным данным отмечается изменение положения поверхности в районе нагнетательного контура (на уровне порога чувствительности) при включении нагнетательных скважин II горизонта. Изменения режимов эксплуатации I горизонта не проявляется на положении поверхности.

При эксплуатации полигонов захоронения возникали определенные трудности и осложнения, которые, однако, не носили характер аварийных ситуаций. Наиболее характерным осложнением является нарушение герметичности поверхностного оборудования и трубопроводов — течи узлов арматуры,

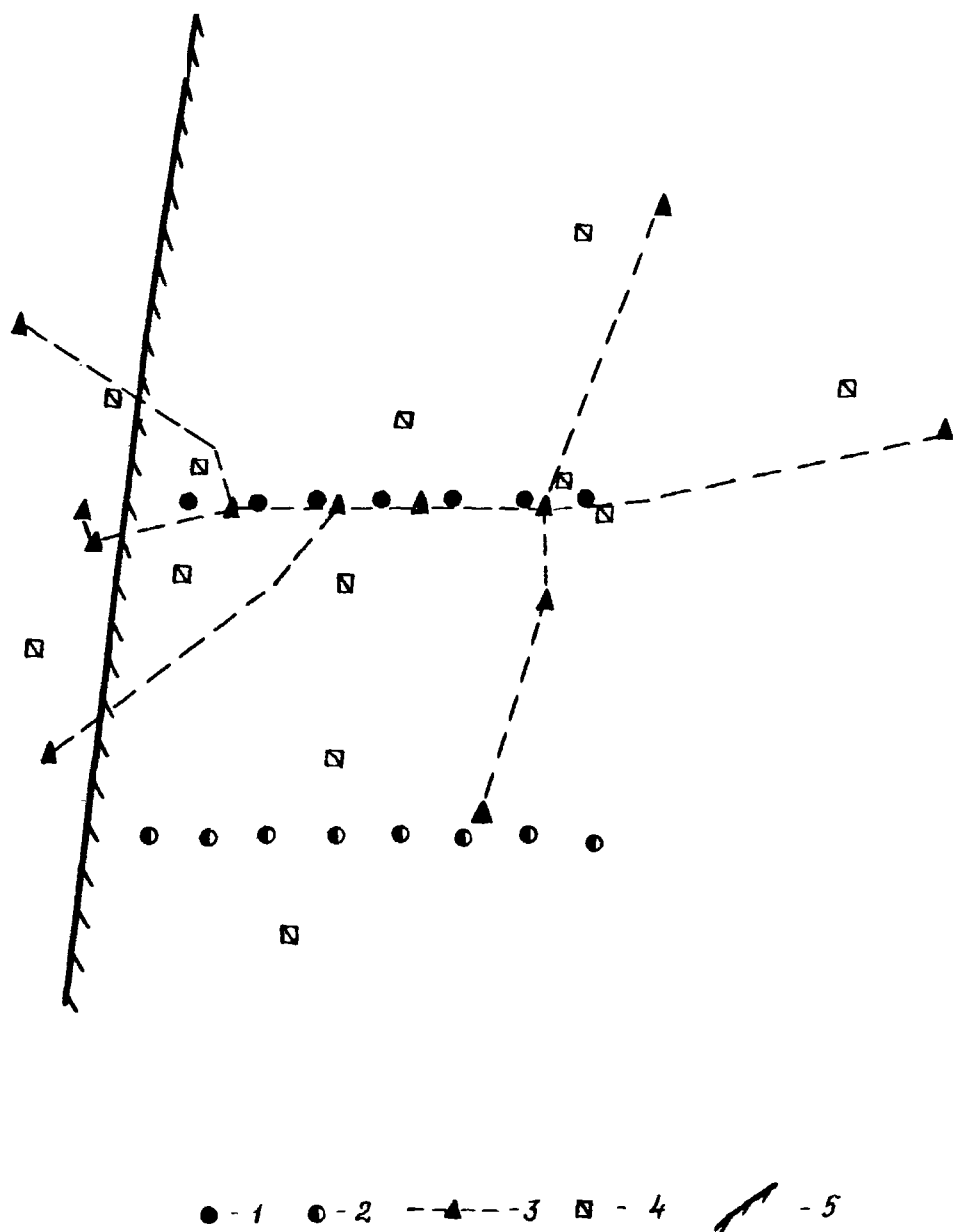


Рис. 35. Схема расположения пунктов сейсмического и геодезического контроля.

1—нагнетательная скважина; 2—разгрузочная скважина; 3—профиль нивелирования и репер; 4—пункт сейсмического контроля; 5—тектонический экран

задвижек, соединений, которые своевременно обнаруживались и канализировались благодаря примененным проектным решениям.

Имело место ухудшение принимающей способности скважин вследствие кольтатации прифилтровых зон пласта-коллектора при нагнетании технологических щелочных отходов. Для восстановления приемистости применялась специальная технология, разработанная ИФХ РАН. В скважине Н-2 произошло перекрытие низа лифтовой колонны вынесенным в скважину материалом из пласта (песчаной «пробкой»). После подъема лифтовой колонны на ~ 4 м работоспособность скважины была восстановлена.

Было установлено интенсивное распространение отходов в пласте-коллекторе II горизонта, превышающее прогнозное. Это осложнение следует рассмотреть более подробно.

На начальном этапе эксплуатации II горизонта с целью экономии фонда скважин нагнетание отходов осуществлялось в 1–2 скважины с повышенными расходами и давлениями нагнетания. Компоненты отходов по данным анализа проб скважинной жидкости и гамма-каротажа были отмечены в близрасположенных к нагнетательному контуру наблюдательных скважинах.

В 1973 г. компоненты отходов, в том числе радиоактивные нуклиды, были отмечены в удаленной наблюдательной скважине (А-38) в маломощном интервале проницаемых пород, выделенном по данным гамма-каротажа в пределах II горизонта. Скважина находилась в границах полигона, однако такие масштабы распространения отходов противоречили принятым представлениям о поведении отходов и о задержке нуклидов породами.

Как показали выполненные исследования, причина подобного явления – распространение отходов по зоне повышенной проницаемости, образовавшейся в результате повышенных давлений нагнетания, близких или превышающих давление гидроразрыва (гидрорасчленения) пласта. В связи с резким увеличением порового пространства интервала фильтрации сорбционные процессы развивались слабо, что обусловило распространение нуклидов на большие расстояния.

В удаленных наблюдательных скважинах (П-20, П-13, П-24) были отмечены термоаномалии, характерные для внутрипластовых вертикальных перетоков в пределах II горизонта. По данным расходомерии были подтверждены перетоки между интервалом максимальной фильтрации, вызванной повы-

шенными давлениями нагнетания, и проницаемыми слоями того же горизонта, не охваченными или охваченными нагнетанием в меньшей степени.

В соответствии с выданными рекомендациями давления нагнетания были снижены при подключении большого числа скважин, что обеспечило равномерное заполнение пласта-коллектора отходами, фильтрацию отходов в пористой среде, задержку нуклидов породами. В скважине А-38 содержания компонентов отходов и значения гамма-поля снизились до фоновых. Произошло снижение содержаний компонентов отходов и в других скважинах. Результаты наблюдений по скважине А-57 показывают интенсивную задержку нуклидов породами.

При обосновании безопасности захоронения РАО на полигоне «Северный» выполнялись прогнозные расчеты миграции отходов в пласте-коллекторе после окончания эксплуатации полигона. Первоначально применялись аналоговое моделирование и простейшие расчеты конечно-разностными методами, в последующем стали использоваться ЭВМ и ПВМ. Основные методические положения прогнозных расчетов приведены в р. 3.4.

На рис. 36 приведены прогнозные контуры распределения в I горизонте индикатора отходов (стабильный, не взаимодействующий с породами индикатор) и радиоактивного нуклида (стронция-90). Учитывались гидравлическая дисперсия, радиоактивный распад, распределение фильтрационных свойств в плане. Результаты прогнозных расчетов использовались для установления границ горного отвода недр.

Были выполнены прогнозные расчеты миграции компонентов отходов с учетом различия плотности вязкости отходов и подземных вод, синклинального характера структуры, гидравлической дисперсии. Как следует из сопоставления с результатами решения плановой задачи плотностные эффекты уменьшают распространение отходов для центральной части («ядра») контура отходов (рис. 37).

При анализе гипотетических осложнений и аварийных ситуаций было установлено, что последствия возможных аварийных ситуаций не повлияют на радиационную обстановку и загрязнение подземных вод за пределами санитарно-защитных зон и горного отвода недр.

Были рассмотрены сценарии возникновения участков фильтрации между опущенным и приподнятым блоками в тектоническом экране. Первым признаком этого явления должно

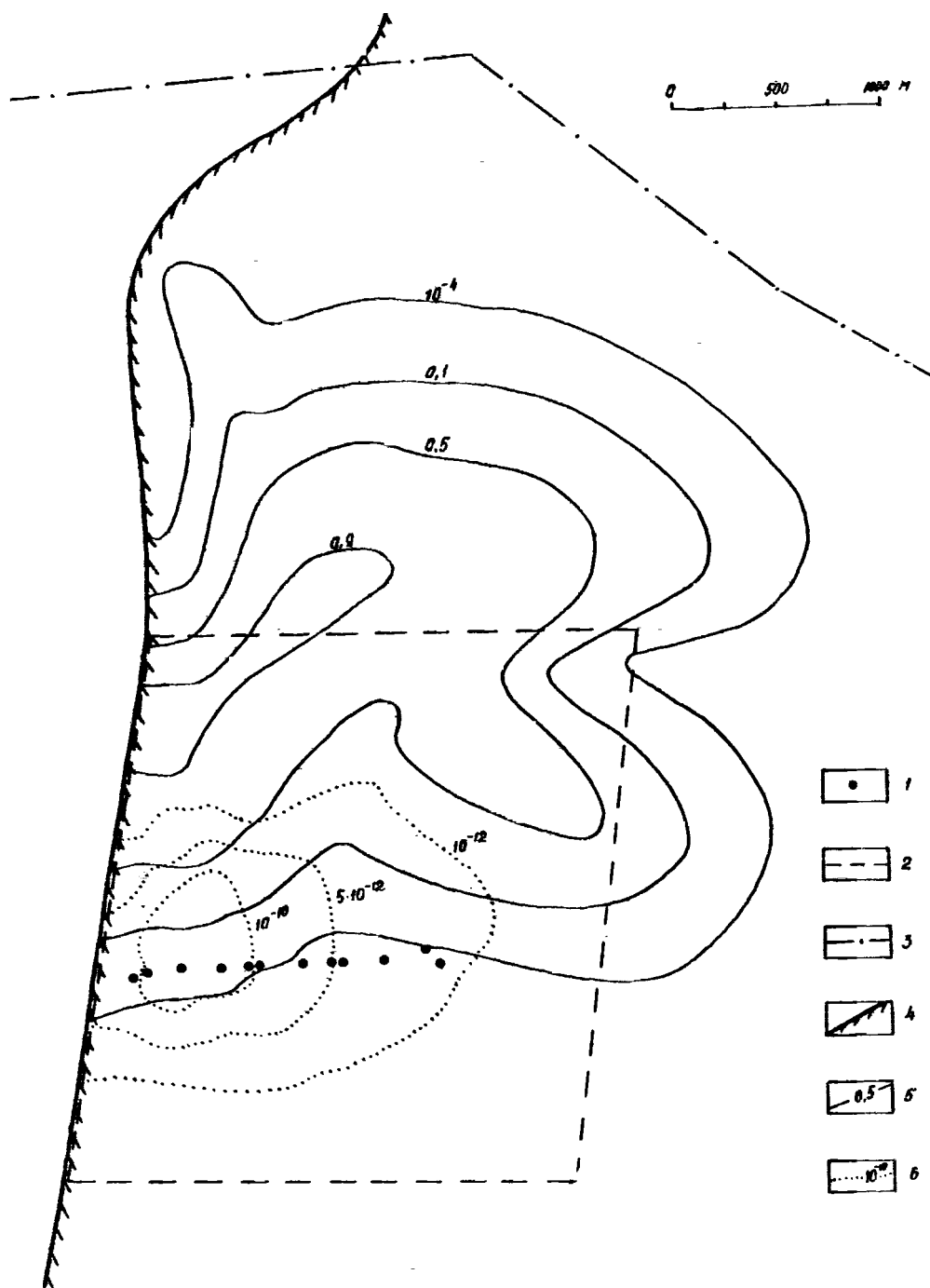


Рис. 36. Прогноз миграции компонентов РАО в районе полигона «Северный»

1—магнететельная скважина; 2—граница полигона захоронения; 3—граница горного отвода недр; 4—тектонический экран; 5—относительное содержание условного индикатора отходов, $t=650$ лет; 6—то же стронция-90, $t=950$ лет. $K_p=0,6 \text{ см}^3/\text{г}$.

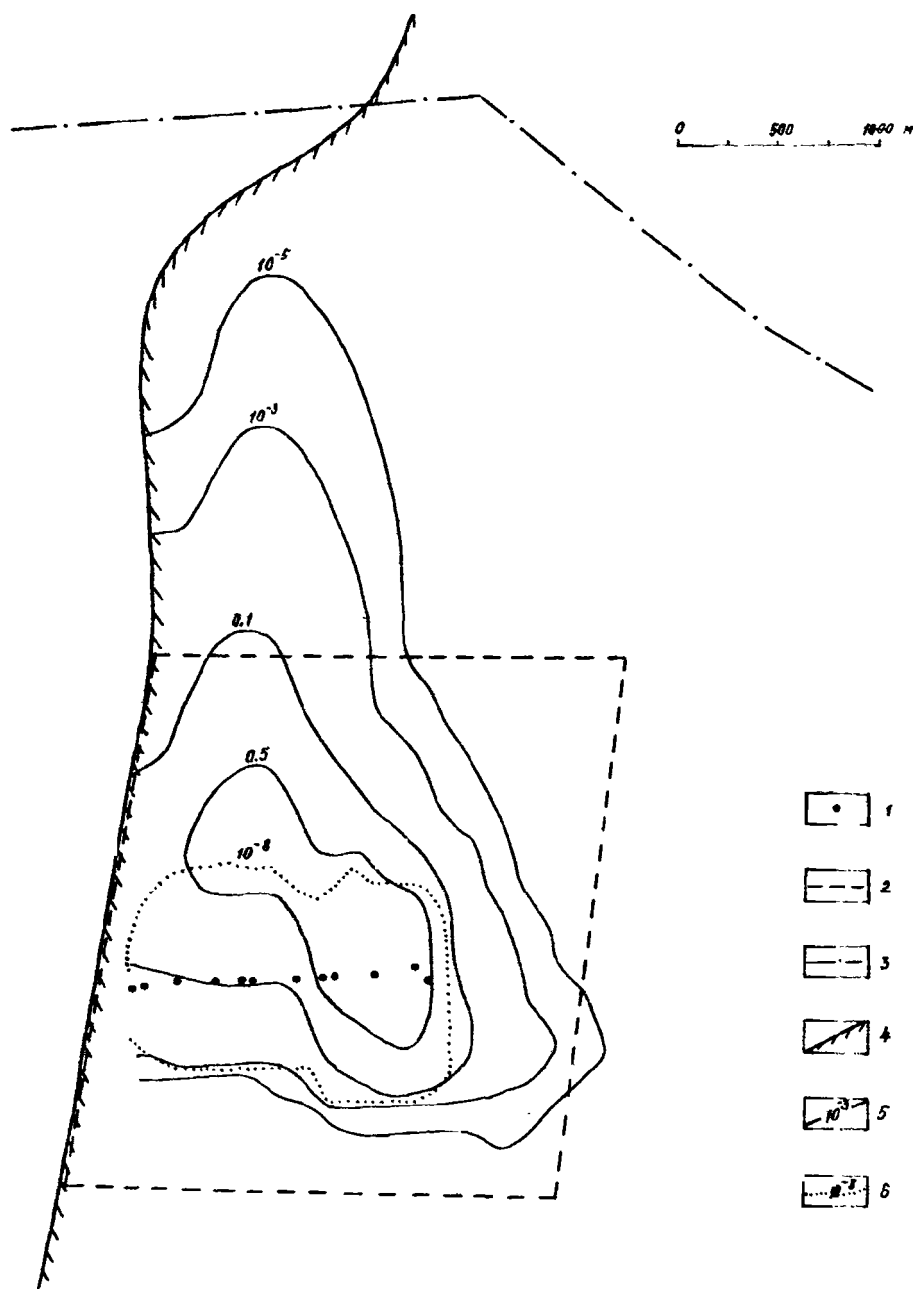


Рис. 37. Прогноз миграции компонентов РАО в районе полигона «Северный» (плотностная конвекция)

1—наблюдательная скважина; 2—граница полигона захоронения; 3—граница горного отвода недр; 4—тектонический экран; 5—относительное содержание условного индикатора отходов, $t=650$ лет; 6—то же стронция-90, $t=500$ лет, $K_p=0,3 \text{ см}^3/\text{г}$.

быть изменение уровней подземных вод в скважинах приподнятого блока. Время и объемы поступления загрязнений в породы приподнятого блока зависят от положения контура компонентов отходов, мигрирующих под влиянием естественного движения подземных вод в водоносных горизонтах опущенного блока. Так, если возникновение взаимосвязи произошло на участке тектонического экрана, расположенном к югу от контура загрязненных вод, мигрирующих в северном направлении, возможно замедление миграции этого контура и перетекание в приподнятый блок чистых вод или содержащих выщелаченные нуклиды, ранее перешедших в твердую фазу — горные породы.

Загрязнение водоносных горизонтов приподнятого блока может произойти при сочетании неблагоприятных факторов — совпадение возникшего фильтрационного «окна» с контуром загрязнения. Развитие глинистых пород в зоне тектонического нарушения, их повышенные сорбционные свойства будут препятствовать проникновению радиоактивных загрязнений в приподнятый блок.

Песчано-глинистые отложения приподнятого блока также входят в горный отвод недр, граница которого расположена на расстоянии ~ 1 км к западу от полигона захоронения. Время достижения этой границы загрязненными водами без учета задержки загрязнений породами оценивается 1 — 2 сотней лет, а с учетом возможного времени возникновения фильтрационного «окна» и физико-химических взаимодействий несколькими сотнями и тысячей лет, в течение которых произойдет распад радиоактивных нуклидов.

Тем не менее при эксплуатации полигона захоронения и после его консервации должны продолжаться наблюдения за тектоническим экраном, главным образом гидродинамические и гидрогеохимические и геофизические наблюдения в скважинах опущенного и приподнятого блока. В качестве противоаварийных мероприятий целесообразно разработать технологию ограничения миграции загрязнений.

Глубинное захоронение жидких РАО ГХК на полигоне «Северный» позволило изолировать от среды непосредственного обитания значительную часть образовавшихся отходов, избежать строительства потенциально опасных поверхностных хранилищ и бассейнов. Это имело большое значение для предупреждения радиационного воздействия на окружающую среду, особенно если учитывать близость объектов ГХК к р. Енисей.

5.3. ПОЛИГОН ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

Геологическая характеристика

Отличительной особенностью геологических условий района НИИАР является широкое развитие осадочных пород общей мощностью до 2300 м. В геологическом разрезе выделены водоносные комплексы, содержащие минерализованные воды, в т. ч. рассолы, и горизонты слабопроницаемых пород, обладающих водоупорными свойствами. Отмечается вертикальная гидрогеохимическая зональность подземных вод, свидетельствующая об изолированности глубоких водоносных горизонтов от поверхности и пресных подземных вод. В связи с этим геолого-разведочные работы были направлены в первую очередь на изучение глубоких частей разреза, залегающих ниже верейского горизонта среднего карбона, широко распространенного на Русской платформе и являющегося флюидоупором для многих нефтяных месторождений, в том числе Ульяновского Поволжья.

Первые результаты геолого-разведочных работ показали большую перспективность района для захоронения жидких РАО. В последующем аналогичный вывод о перспективности района для проведения работ по созданию систем захоронения различных промстоков был сделан учеными геологического факультета Саратовского университета.

Одним из важных обстоятельств признания перспективности глубоких горизонтов для захоронения РАО является высокое солесодержание насыщающих их вод. Если оценить токсичность природных рассолов и отходов по отношению их основных компонентов к значениям ДКБ (ПДК) в питьевых водах тех же компонентов, то полученные относительные токсичности будут одного порядка, причем токсичность РАО будет снижаться во времени вследствие распада нуклидов.

В разрезе осадочной толщи было выделено 7 проницаемых зон. В качестве перспективных для захоронения отходов были выделены в отложениях нижнего карбона III и IV проницаемые зоны, залегающие на глубинах соответственно 1440—1500 м и 1130—1410 м и перекрытые верейским горизонтом. Выше верейского горизонта залегают V и VI проницаемые зоны, так же содержащие минерализованные воды и выполняющие роль буферного горизонта. От неглубоко-залегающих горизонтов пресных вод V и VI зоны отделены мощной толщей слабопроницаемых пермских отложений.

Схема стратиграфического расчленения осадочных отложений района приведена на рис. 38.

III проницаемая зона сложена терригенными породами яснополянского горизонта, входящего в состав тульского яруса нижнего карбона, и представлена слабосцементированными глинистыми песчаниками с прослоями глин и алевролитов, обогащенных углистым веществом. На границе III зоны и вышележащих отложений отмечается малоощный слой кавернозных песчаников с известковым цементом.

IV проницаемая зона сложена карбонатными породами окско-серпуховского и башкирского горизонтов, которые состоят из трещиноватых известняков, в том числе доломитизированных, доломитов. Фильтрационные и емкостные характеристики III и IV проницаемых зон приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3.

Фильтрационные и емкостные параметры пластов-коллекторов НИИАРа

№№ п/п	Параметры	Ед. изм.	III прони- цаемая зона	IV прони- цаемая зона
1	2	3	4	5
1.	Глубина залегания	м	1440 ÷ 1550	1130 ÷ 1410
2.	Мощность	м	45	320
3.	Эффективная мощность	м	35	80
4.	Общая пористость		0,14	0,01 ÷ 0,26
5.	Эффективная пористость		0,06	0,02
6.	Водопроницаемость	м ² /сут	35	6
7.	Коэффициент фильтрации	м/сут	1,0 (рассол)	0,1
8.	Коэффициент пьезопроводности	м ² /сут	5 × 10 ⁵	4 × 10 ⁴
9.	Напор над кровлей	м	1585 ÷ 1650	1250 ÷ 1280
10.	Солесодержание вод	г/л	230 – 260	205 – 220

Воды, насыщающие III и IV проницаемые зоны, относятся к хлоридно-натриевому типу, общее солесодержание 205–260 г/л, в состав вод входят также кальций, магний, калий, сульфат и хлор-ионы, микрокомпоненты. Естественную скорость и направление движения подземных вод оценить затруднительно, предполагается, что скорость не превышает сантиметров и десятых долей метра в год и в различные

ГРУППА	СИСТЕМА	ЯРУС	ИНДЕКС	УСЛОВНЫЙ ИНДЕКС	ЛИТОЛОГИЯ	МОЩНОСТЬ ГОРИЗОНТА	О П И С А Н И Е П О Р О Д
Kz	четвертичная		Q	VII		50	пески, суглинки, глины
Mz	триасовая юрская		T-J			75	глины, прослои песчаников, алевролиты
П А Л Е О З О Й С К А Я	ПЕРМСКАЯ	ТАТАРСКИЙ	P ₂ ⁿ	V		135	плотные бурые глины аргиллитоподобные, прослои алевролитов и песчаников
		КАЗАНСКИЙ	P ₂ ^{kr}	VI		120	глинистые мергели, известняки и доломиты с прослоями гипса
		САКМАРСКИЙ	P ₁ ⁿ			95	галогеенные породы — гипсы и ангидриты
	КАМЕННОУГОЛЬНАЯ	гжельско-касимовский	C ₃	V		260	известняки и доломиты светло-серые, органогенно-детритовые. Породы кавернозно-пористые, трещиноватые
		МОСКОВСКИЙ				315	известняки и доломиты в разной степени трещиноватые и пористые
		верейский	C ₂ ^{vr}	A		45	аргиллиты и глины
		башкирский	C ₂ ⁿ	IV		40	известняки
		окско-серпуховский				265	доломитизированные известняки и доломиты, слабоцементированные песчаники с тонкими прослоями глин
		тульский	C ₁ ^{2(n+u)}			90	песчаники с прослоями глин и аргиллитов
		турнейский	C ₁ ⁿ			>300	переслаивание темно-серых сланцев, глинистых известняков и аргиллитов, кремнисто-витуминозных известняков

Рис. 38. Схема стратиграфического расчленения палеозойских и мезокайнозойских отложений в районе НИИАГ

геологические эпохи может иметь разнонаправленный характер.

В тектоническом отношении район расположен в пределах Ульяновской межблоковой зоны, западной окраины Мелекесской впадины близи ее границы со Ставропольской впадиной. В структурном плане кристаллического фундамента отчетливо проявляется блоковое строение, которое отражается в структуре вышележащей осадочной толщи в виде малоамплитудных деформаций типа флексур. По данным различных исследова-

телей, использовавших материалы геофизических работ и бурения скважин, в районе НИИАР не отмечены нарушения разрывного характера в отложениях каменноугольного возраста и выше. Отсутствуют также предпосылки существования таких нарушений.

К югу от района полигона захоронения (6—8 км) в кристаллических породах фундамента выделена Ульяновско-Мокшенская зона разрывных дислокаций. Характерно, что на продолжении этой зоны в образованиях нижнего карбона обнаружены нефтяные месторождения, что свидетельствует о достаточной изолирующей способности геологических формаций даже в зонах региональных тектонических нарушений, прослеживаемых в фундаменте и осадочных образованиях, залегающих ниже флюидоупоров.

По данным сейсморазведочных работ, непосредственно в районе полигона наиболее приподнятые участки выделяются на северо-западной части исследованной площади, наиболее погруженные — на юго-востоке. В центральной части участка в отложениях перми отмечено небольшое локальное поднятие юго-восточной протяженности — структурный «нос» с амплитудой 20—30 м и шириной ~1 км.

В соответствии со сведениями по новейшей тектонике район НИИАР входит в низкоамплитудную структурную зону, характеризуется пониженной плотностью мегатрещиноватости.

В качестве основного коллекторского горизонта первоначально была принята III проницаемая зона, сложенная песчано-глинистыми отложениями. Песчаные коллекторские горизонты хорошо зарекомендовали себя при захоронении жидких РАО СХК. Предполагалось, что преобладание блоковой пористости над трещиной обеспечит равномерное заполнение коллектора отходами. Однако характер взаимодействия малосоле-содержащих отходов, а иногда ультропопресных (дистиллят) с песчано-глинистыми породами, насыщенными рассолами, осложнил нагнетание отходов (см. ниже) и в качестве основного горизонта в дальнейшем использовалась IV проницаемая зона.

Выбранные в качестве коллекторских горизонты обладали необходимой емкостью и фильтрационными параметрами (табл. 5.3), были изолированы от вышележащих горизонтов водоупорными образованиями, относились к зоне затрудненного водообмена. Принципиальная возможность и безопасность захоронения жидких РАО в целом не вызывали сомнений, что позволило начать сооружение и эксплуатацию опытной установки (скв. Р-3) до завершения бурения части разведочных скважин и строительства в целом опытно-промышленного полигона.

Полигон захоронения

Опытно-промышленный полигон (ОПП) захоронения нетехнологических отходов исследовательских установок НИИАР расположен непосредственно на территории промзоны и вблизи цеха очистных сооружений, в котором осуществляется подготовка отходов к захоронению.

Полигон включает 5 нагнетательных скважин, вскрывающих III и IV проницаемые зоны, 32 наблюдательных скважины (рис. 39).

Удаляемые отходы включают растворы от дезактивации оборудования, помещений и спецодежды, душевые воды санпропускников, сбросы контурных вод и бассейнов выдержки топлива. В отходах содержатся фосфаты, оксалаты, сульфокислоты, нитраты, масла. Сухой остаток до 3,6 г/л. Удельная активность до $1 \cdot 10^{-5}$ Ки/л, в составе нуклидов изотопы цезия, стронция, рутения, циркония, редкоземельных элементов. Долгоживущие нуклиды находятся в следовых концентрациях.

В 1966 г. была введена в эксплуатацию опытная установка, в которой использовались в качестве нагнетательной скважина Р-3 и несколько наблюдательных скважин. Удаление низкоактивных отходов осуществлялось с расходом до 500 куб. м в сут и при давлениях до 5,0 МПа.

При опробовании опытной установки нагнетанием пластовой воды (рассола) были получены параметры коллекторского горизонта, близкие определенным на стадии геолого-разведочных работ. При нагнетании пресной воды, по макросоставу близкой отходам НИИАР, было отмечено резкое падение принимающей способности скважины — рост давления при снижении расхода.

После проведения гидроразрыва пласта для воздействия на прифильтровую зону по технологии, применяемой на нефтяных скважинах (3 этапа), принимающая способность скважины улучшилась, что позволило эксплуатировать скважину Р-3 в необходимом режиме.

В 1969 г. в наблюдательных скважинах Р-10 и Н-1, по данным гамма-каротажа, были обнаружены повышенные значения гамма-поля. Анализ геолого-геофизической документации по скважинам показал, что распространение отходов на значительные расстояния связано с заполнением маломощного проницаемого пласта известковистых кавернозных песчаников мощностью около 5,0 м, отмечаемого в кровле III проницаемой зоны.

Преимущественное заполнение отходами пласта кавернозных песчаников объясняется резким снижением проницаемости

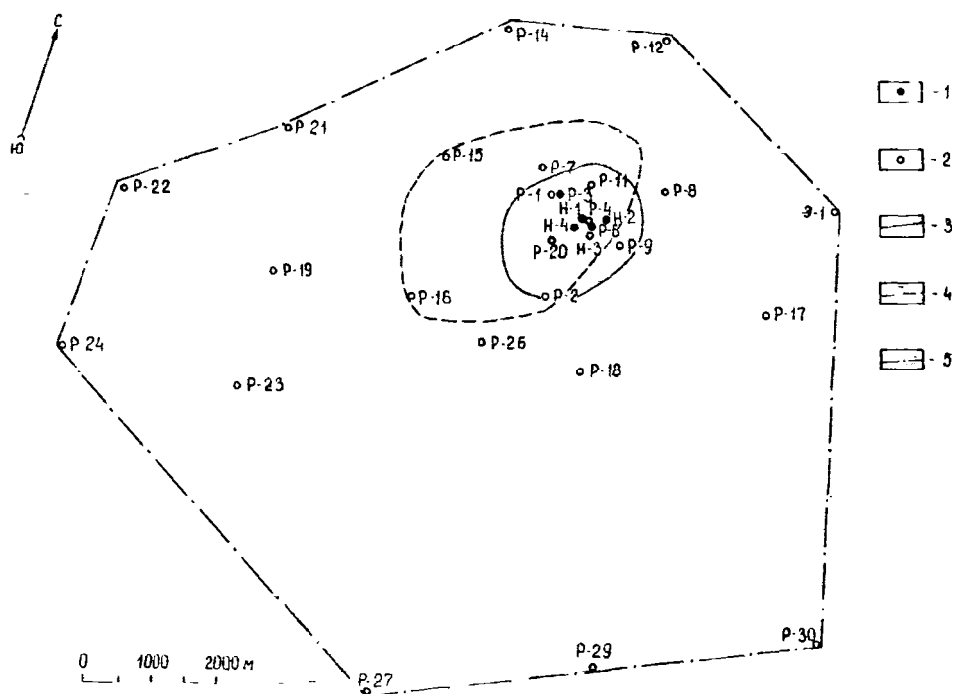


Рис. 39 Схема расположения скважин и контуров распространения отходов в пластах-коллекторах полигона захоронения РАО НИИАР

1 — нагнетательная скважина и ее номер; 2 — наблюдательная скважина и ее номер; 3, 4 — контуры отходов в IV и III проницаемых зонах; 5 — граница горного отвода недр.

глинистых песчаников, слагающих III зону, при смене в поровом пространстве рассола на пресные воды или малосолесодержащие отходы (дистиллят). Подобные явления отмечались и при разработке нефтяных месторождений, были установлены при специальных исследованиях и связаны с гидратацией глинистой составляющей пород. При проведении гидроразрыва пласта была повышена проницаемость маломощного слоя кавернозных песчаников.

Имелось также и другое объяснение причин распространения удаляемых отходов на значительные расстояния — «всплытие» более легких отходов к кровле пласта-коллектора вследствие плотностной конвекции (гравитационной сегрегации) [37]. Однако четкая приуроченность, по данным гамма-каротажу, интервала фильтрации к маломощному пласту кавернозных песчаников, результаты гидроразрыва пласта и данные наблюдений за распространением отходов в IV проницаемой зоне, не позволяют согласиться с этой гипотезой.

Контур отходов в III проницаемой зоне не вышел за пределы санитарно-защитной зоны, однако дальнейшая ее эксплуа-

тация могла привести к преждевременному достижению отходами проектных границ. В связи с этим в качестве основного пласта-коллектора опытно-промышленного полигона было рекомендовано использование IV проницаемой зоны. III проницаемая зона была принята резервной и при необходимости может использоваться для удаления отходов с повышенным содержанием. Общий объем удаления отходов в III проницаемую зону составил 0,6 и в IV — 1,5 млн. куб. м.

IV проницаемая зона сложена карбонатными породами с двойным типом пористости — трещинной и блоковой, масштабы распространения в ней отходов существенно меньше при больших объемах удаленных отходов. На рис. 39 приведены контуры отходов в III и IV зоне, установленные по данным контрольных наблюдений и прогнозных расчетов.

Нагнетание отходов сопровождается закономерным ростом пластовых давлений. Уменьшение глубин уровней подземных вод в наблюдательных скважинах связано как с изменением пластовых давлений, так и с уменьшением содержания и, соответственно, плотности жидкости в стволе скважины вследствие поступления фильтрата отходов. Это обстоятельство затрудняет интерпретацию данных гидродинамических наблюдений. В состав наблюдений должны входить измерения с глубинным манометром.

Появление компонентов отходов в районе наблюдательной скважины отмечается прежде всего, по данным гамма-каротажа, повышением значений гамма-поля против интервалов пород, содержащих фильтрат отходов. Характерно, что радиоактивные нуклиды и другие компоненты отходов обнаруживаются в пробах жидкости, отбираемых из фильтровых зон наблюдательных скважин, значительно позже, чем по данным гамма-каротажа, отражающим распределение нуклидов в породах за обсадной колонной скважины.

Это обусловлено следующими факторами:

- распространением основного гамма-излучающего компонента отходов цезия-137, а также рутения-106 и церия-144 с фильтратом отходов по проницаемым зонам пласта-коллектора с преимущественно трещинным типом пористости при относительно невысокой задержке нуклидов карбонатными породами, содержащими рассолы;

- накоплением нуклидов в породах ближней зоны скважины, ввиду присутствия в них фильтрата глинистого бурового раствора, поступившего при бурении скважины;

- разбавление фильтрата отходов с малой плотностью при поступлении во внутреннее пространство скважины, первоначально заполненное природным рассолом.

На рис. 40 приведены характерные диаграммы гамма-каротажа в наблюдательных скважинах опытно-промышленного полигона, расположенных на различных расстояниях от нагнетательных. Отмечается заполнение отходами отдельных проницаемых зон, выделяемых повышенными значениями гамма-поля в пределах всей мощности IV проницаемой зоны, образованием зоны гидравлической дисперсии (смещения отходов и пластовых вод) большой протяженности. Последнее обусловлено неоднородностью пород, изменением профиля приемистости нагнетательных скважин во времени из-за колюматации проницаемых интервалов.

На рис. 41 приведен график изменения гамма-поля (относительные значения) в скважине Р-9 для интервала проницаемых пород в средней части IV зоны в период прохождения через ее сечение зоны дисперсии. За «I» принято максимальное значение, отмеченное в 1990 г. и соответствующее активности $\sim 1 \times 10^{-5}$ Ки/дм³ (по цезию-137), что близко активности отходов.

Было установлено, что ширина зоны дисперсии в районе скв. Р-9 1–1,5 км. Зона дисперсии характеризуется изменением плотности смеси отходы—пластовые рассолы от плотности последних до плотности отходов и, соответственно, малым значением плотностного градиента в горизонтальном направлении. Это обстоятельство существенно уменьшает влияние плотностной конвекции (гравитационной сегрегации) на распределение отходов. Чередование зон пород повышенной проницаемости (трещиноватых) и пониженной проницаемости (преимущественно с блоковой пористостью) по мощности IV зоны обуславливает анизотропию фильтрационных свойств, что также уменьшает влияние плотностной конвекции. Это следует из данных геофизических исследований (рис. 39). Несмотря на длительное время наблюдений, в том числе в скважине, IV зона в которой обсажена сплошной колонной, признаков «всплытия» отходов не отмечено.

По данным наблюдений за распространением отходов в III проницаемой зоне, отмечается плановая неоднородность: компоненты отходов были обнаружены в весьма удаленной скважине Р-16 и не отмечены в скважине Р-8. Высказано предположение, что это может быть связано с уменьшением глубины залегания пластов в направлении скважины Р-16 (уклон 0,005) и наличием структурного «носа» (положительной структуры) юго-восточной протяженности, по оси которой проницаемость может быть выше.

Преимущественно трещинный характер пористости IV проницаемой зоны позволил осуществить удаление ограниченных порций отходов с повышенным содержанием твердой фазы —

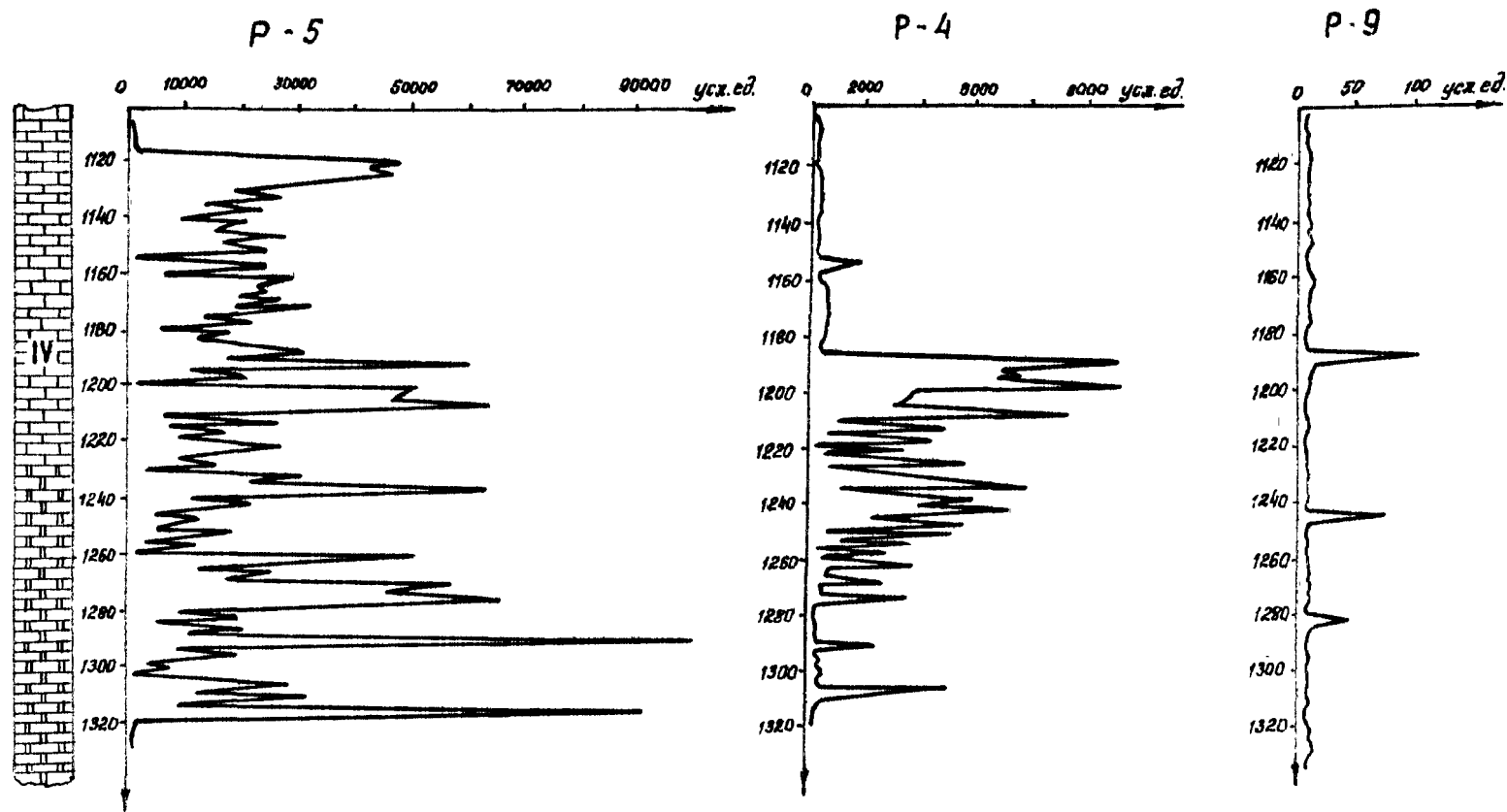


Рис. 40. Результаты гамма-каротажа наблюдательных скважин полигона захоронения РАО НИИАР

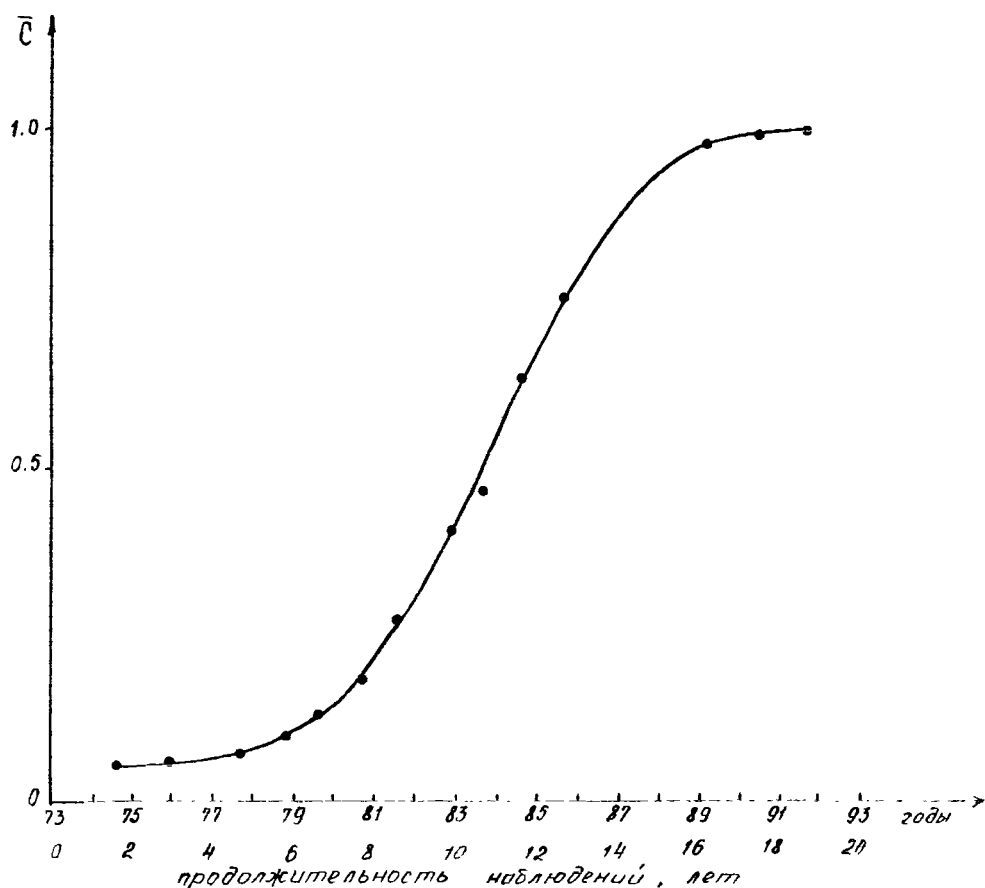


Рис. 41. Изменение относительных содержаний радионуклидов в породах приквацинной зоны пласта-коллектора (скв. Р-9)

взвешенных частиц до 1 г/л, образующихся в нижней части технологических емкостей при подготовке отходов к захоронению. Перед удалением подобных отходов осуществлялось диспергирование отстоя в емкостях и их нагнетание в пласт-коллектор при максимально-возможных расходах для обеспечения скорости перемещения жидкости в прифилтровой зоне пласта выше критической (скорости осаждения взвесей), последующая продавка отходов растворами без взвесей или водой. Давления нагнетания при этом не превышали 5,0 МПа.

Контроль окружающей среды и оценка безопасности захоронения РАО

Для контроля состояния геологической среды используют 32 наблюдательные скважины полигона захоронения, кото-

рые расположены как в районе нагнетательного контура, так и на расстояниях до 10 км от центра полигона (рис. 39). Скважины вскрывают используемые для захоронения отходов III и IV проницаемую зоны и вышележащие горизонты, включая неглубокозалегающие горизонты пресных вод. В скважинах осуществляются гидродинамические и геофизические измерения, отбор проб подземных вод на различные виды анализа.

В районе полигона захоронения оформлен горный отвод недр (рис. 39). В 4–5 км к юго-западу от границ горного отвода недр расположен водозабор подземных вод из неглубокозалегающих горизонтов, к северо-востоку от границ горного отвода осуществляется отбор подземных вод из отложений верхнего карбона в бальнеологических целях.

Анализ гипотетических осложнений и аварийных ситуаций при захоронении отходов, в том числе нарушение герметичности обсадных колонн скважин, ухудшение изолирующей способности цементного камня в затрубном пространстве, разрушение поверхностного оборудования (см. р. 3.5), показал, что эти события, в случае их реализации, будут своевременно обнаружены существующей службой контроля на начальной стадии их развития, их последствия не приведут к загрязнению подземных вод за пределами горного отвода недр и санитарно-защитных зон. Развитие осложнений может быть приостановлено проведением специальных мероприятий, в том числе профилактического характера. Необходимо подчеркнуть, что в ряду возможных осложнений геологические факторы занимают последнее место по степени негативного влияния и вероятности реализации.

Результаты контроля эксплуатации опытно-промышленного полигона захоронения позволили уточнить емкостные параметры пласта-коллектора IV проницаемой зоны: эффективная мощность — 50 м, эффективная пористость — 0,02, удельная емкость ~ 1 м, длина зоны дисперсии $\sim 1,5$ км. Расчеты распространения компонентов отходов показывают, что после захоронения отходов в IV проницаемую зону в течение 28 лет (до 2000 г.) с учетом дисперсии и фильтрационной неоднородности радиус контура отходов составит 2,5–3 км от центра полигона. После остановки нагнетания будет происходить весьма замедленное перераспределение отходов в пределах сформированного контура при переходе нуклидов из поровой жидкости в породы. Вследствие радиоактивного распада через ~ 300 лет активность нуклидов в поровой жидкости и в породах снизится до значений, ниже граничных для отнесения жидкости или твердых веществ к радиоактивным отходам.

В связи с открытием в последние годы на территории Ульяновского Заволжья ряда небольших месторождений нефти была выполнена прогнозная оценка влияния извлечения нефти на захороненные отходы на полигоне НИИАР.

Зимницкое, Филипповское, Аллагуловское и Западно-Лабитовское месторождения многопластовые, приурочены к куполовидным поднятиям рифогенного характера и расположены на расстоянии 12–25 км от границ полигона захоронения. Залежи нефти отмечены на глубинах 900–1500 м в турнейских, яснополянских, башкирских и верейских отложениях карбона. Выше верейского горизонта нефтеносных пластов не обнаружено, что свидетельствует о значении этого горизонта как региональной покрывки для нижележащих комплексов пород. Нефти относятся преимущественно к разряду тяжелых.

Как показывают прогнозные расчеты, выполненные для ближайшего Аллагуловского месторождения, находящегося в 19 км от центра полигона и в 12 км от южной границы его горного отвода, при добыче нефти 500 тыс. куб. м в год из башкирского горизонта среднего карбона (IV проницаемая зона) радиус границы притока подземных вод составит ~2,8 км для 25-летнего срока эксплуатации месторождения и ~5,6 км для 100-летнего срока эксплуатации. Эти значения существенно меньше расстояния до полигона.

Наиболее частными осложнениями при эксплуатации опытно-промышленного полигона были отказы поверхностного оборудования, течи соединений, которые своевременно обнаруживались и устранялись. Имела место негерметичность обсадной колонны наблюдательной скважины, которая была обнаружена и ликвидирована проведением ремонтно-ликвидационных работ. Как осложнение может быть квалифицировано площадное распространение отходов в маломощном интервале кровли III проницаемой зоны при эксплуатации опытной установки скв. Р-3, о чем сказано выше.

Однако наиболее значимые осложнения связаны с беспочвенными обвинениями в адрес НИИАР и глубинного захоронения жидких РАО различными безответственными журналистами, политическими деятелями, некоторыми учеными, в основе деятельности которых лежит сбор компроматов на предприятия атомной энергии, спекуляция на экологических проблемах. Некоторые подобные осложнения носили характер курьезов.

Так, в 1990 г. в районе НИИАР проводились сейсморазведочные работы методом ОГТ. Исполнитель работ — геофизическая партия организации Министерства геологии провела два взрыва химического взрывчатого вещества по 300–600 кг в неглубоких (15–20 м) скважинах в непосредственной близости

сти от жилой зоны НИИАР в г. Димитровграде. Проведение взрывных работ было согласовано с соответствующими органами в январе 1990 г., а взрывы проведены в июне без предварительного дополнительного уведомления.

Взрывы были приняты населением за землетрясения, а выброс взрывных газов из скважины — за НЛО. Сначала в местной печати, а затем в центральной (газета «Известия», 17.08.90 г.) были опубликованы статьи, в которых высказывалось мнение о связи «землетрясений» с захоронением отходов НИИАР. На основании этих данных группа ученых Института Физики земли РАН (Гохберг М. Б., Рейснер И. Г., Шебалин Н. В., Штейнберг В. В.) обратились в Правительство с предсказанием грядущей экологической катастрофы в районе средней Волги, Администрация Ульяновской области потребовала прекращения деятельности НИИАР.

Правительственная комиссия под председательством академика Страхова В. Н. установила истинные причины «ядерных землетрясений», дала оценку условий безопасности эксплуатации опытно-промышленного полигона. Местная печать опубликовала материалы, правильно освещающие события [62, 63]; газета «Известия» не смогла сделать этого.

В 1992—93 гг. сотрудниками Казанского университета было высказано утверждение о том, что опытно-промышленный полигон захоронения отходов НИИАР находится в зоне глубинного тектонического нарушения, по плоскости которого произошло загрязнение радиоактивными нуклидами иловых отложений Черемшанского залива Куйбышевского водохранилища. Как выяснилось, вывод о приуроченности полигона к зоне тектонического нарушения сделан по карте масштаба 1:25 000 00 (1 см—25 км), по которой затруднительно установить, что полигон НИИАР находится в 6—8 км от нарушения (Ульяновско-Мокшинская зона дислокаций), а пробы илов отбирались в месте сброса в 60-х годах условно чистых стоков НИИАР, содержащих радиоактивные нуклиды, которые накапливались в илах. Могут быть приведены и другие примеры.

Результаты захоронения жидких РАО НИИАР подтвердили перспективность использования глубоких горизонтов карбонатных отложений для удаления промстоков, позволили установить некоторые закономерности распространения отходов в недрах, в частности характер заполнения трещинного порового пространства и дисперсионных явлений, установить малое влияние плотностной конвекции на распределение отходов вопреки устоявшемуся мнению о значимом воздействии этого фактора.

Однако основное значение глубинного захоронения РАО НИИАР — изоляция от среды непосредственного обитания более 2,0 млн. куб. м отходов, содержащих радиоактивные вещества, отказ от сброса стоков в воды Куйбышевского водохранилища. Удалось избежать накопления РАО на поверхности в специальных сооружениях, не гарантирующих защиту грунтовых вод от радиоактивных загрязнений.

Были выполнены исследования и опытные работы по установлению принципиальной возможности захоронения на полигоне НИИАР других отходов предприятий отрасли и Димитровградского промышленного района: отходов гальванических производств, в том числе Димитровградского автоагрегатного завода, отходов АЭС после переработки на установке глубокого упаривания. Достигнуты положительные результаты. Удаление подобных отходов не повлияет на условия безопасности захоронения, размеры горного отвода недр.

5.4. ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Результаты исследований, выполненных при обосновании и создании полигонов захоронения жидких РАО, опыт их эксплуатации и контроля состояния отходов в коллекторских горизонтах позволяют сформулировать следующие общие выводы, представляющие интерес для комплексного использования недр и решения различных гидрогеологических задач.

1. Принципиально возможно и технически осуществимо в промышленных масштабах размещение (захоронение) различных промстоков (в том числе жидких РАО) в коллекторских породах глубоких водоносных горизонтов, удовлетворяющих определенным требованиям. При захоронении обеспечивается локализация отходов в пределах устанавливаемых в недрах границ. Захоронение отходов не сопровождается отрицательным воздействием на объекты окружающей природной среды за пределами санитарно-защитных зон и горного отвода недр.

2. Для захоронения отходов могут быть использованы песчано-глинистые или карбонатные пористые проницаемые породы, залегающие в виде слоев (пластов), подстилаемые и перекрываемые слабопроницаемыми породами, обладающими свойствами водоупоров. Геологические и гидрогеологические условия мест предполагаемого захоронения должны быть исследованы для установления их соответствия требованиям локализации отходов в ограниченных объемах недр, для получения исходных данных, необходимых при обосновании и проектировании.

3. Применяемые методы и технические средства геолого-разведочных работ и исследований позволяют получить информацию, достаточную для создания полигонов захоронения. Выполняемые прогнозы процессов захоронения в целом подтверждаются фактическими данными, полученными в течение 30-летнего периода эксплуатации действующих полигонов захоронения.

4. При исследовании мест предполагаемого захоронения наиболее важное значение имеет установление емкостных и фильтрационных свойств пород, плановой и вертикальной фильтрационной неоднородности, изучение перекрывающих пласты-коллекторы слабопроницаемых пород и условий изоляции пластов-коллекторов от вышележащих горизонтов, пьезометрической поверхности подземных вод, характера и скорости их естественного движения, изучение взаимодействия отходов с геологической средой, определение геолого-технических условий сооружения скважин. Проведение исследований, обоснование и прогнозирование процессов захоронения существенно затруднены для коллекторских горизонтов, в составе которых имеются карстовые полости или зоны с аномально-высокой проницаемостью, тектонические структуры разрывного характера.

5. Коллекторские горизонты, используемые для захоронения промстоков, представляют собой слоистые системы. Песчано-глинистые коллектора состоят из слоев и пропластков различной проницаемости, прослеживаемых по площади на ограниченные расстояния. Карбонатные коллектора состоят из преимущественно горизонтально залегающих зон повышенной проницаемости, обусловленной трещинной пористостью, зон с преобладанием блоковой пористости и слабопроницаемых пород.

При нагнетании отходов в слоистый пласт-коллектор первоначально происходит заполнение слоев и зон повышенной проницаемости. В связи с кольматацией поглощающих слоев происходит перераспределение интервалов поглощения и подключение слоев меньшей проницаемости, перераспределение отходов между слоями, что обуславливает заполнение отходами большинства проницаемых слоев пласта-коллектора.

На контакте отходы — пластовые воды образуются зона гидравлической дисперсии, что наряду со слоистым строением пласта уменьшает влияние различия плотностей отходов и подземных вод (плотностной конвекции) на распространение отходов.

Плотностная конвекция проявляется при наклонном залегании слоев (синклинальном или антиклинальном) для центральных частей контура отходов, в наибольшей степени отличающихся по плотности от подземных вод, и для длительных периодов времени.

При длительном контакте отходов с породами происходит заполнение тупиковых и капиллярных пор, блоковой пористости. Значения эффективной пористости возрастают и приближаются к общей.

6. На масштабы распространения отходов влияет давление нагнетания. При нагнетании в режиме гидроразрыва (гидрорасчленения) пласта возможно интенсивное продвижение отходов по образующимся маломощным зонам.

Изменение напорного режима водоносных горизонтов при регламентировании максимальных давлений нагнетания ниже давлений гидроразрыва составляет 1 до 15% от первоначальных естественных напоров и не приводит к ощутимым геодинамическим явлениям.

7. В результате физико-химических процессов в системе отходы — породы — пластовые воды, радиоактивные нуклиды и некоторые химические соединения — компоненты отходов переходят в твердую фазу в виде сорбата на породах и осадках труднорастворимых соединений. Наиболее интенсивно эти процессы протекают при низком солесодержании подземных вод, отходов или их фильтрата. При высоком солевом фоне превалирующим процессом перехода нуклидов в твердую фазу является осадкообразование в системе отходы — подземные воды. Потоком подземных вод десорбируется только часть нуклидов и некоторых соединений. Переход остальных нуклидов в поровую жидкость весьма замедлен и происходит по схеме выпелачивания.

В результате происходит задержка распространения нуклидов относительно водной фазы, накопление нуклидов в районе нагнетательных контуров.

Имеется принципиальная возможность интенсификации процессов перехода в твердую фазу из поровой жидкости радиоактивных нуклидов применением специальной технологии подготовки отходов, обработки пород пласта-коллектора, соответствующих режимов захоронения.

8. Слабопроницаемые горизонты (преимущественно глинистые), перекрывающие коллекторские, обеспечивают изоляцию находящихся в них отходов. По данным 30-летних наблюдений, фильтрация отходов и диффузионный перенос нуклидов в заметных масштабах не установлены. Маломощные глинистые прослои в составе коллекторских горизонтов разделяют

потоки отходов в выше- и нижезалегающих слоях проницаемых пород и играют роль, таким образом, локальных водопоров.

9. Тектонические нарушения, плоскости смещения которых заглинизированы и по данным геолого-разведочных работ являются гидравлическими экранами, обеспечивают изоляцию используемых для захоронения коллекторских горизонтов, расположенных по сторонам плоскости смещения, что установлено по данным длительных наблюдений. Флексурообразное залегание глинистых слоев слабопроницаемых горизонтов на участках тектонических нарушений («ступеней») в кристаллическом фундаменте не снижает изолирующих свойств горизонта, если последний не содержит участков интенсивного опесчанивания глин (фильтрационных «окон»).

10. Процессы глубинного захоронения контролируемы. Применение методов гидродинамического, гидрогеохимического и геофизического контроля позволяет получать целостную картину о распределении отходов и протекании сопутствующих процессов. Данные контроля могут использоваться для оптимизации режимов захоронения и подтверждения безопасности.

11. Наиболее ответственной подсистемой системы глубинного захоронения являются нагнетательные скважины, во многом определяющие эффективность и безопасность захоронения. Должны применяться скважины специальной конструкции, учитывающей, как и технология их сооружения, геологические условия бурения, крепления и освоения, характеристики подземных вод и отходов. Все проводимые работы по сооружению скважины должны контролироваться с оценкой их качества. При этом первоочередное внимание должно уделяться контролю распределения и качества цементного кольца в затрубном и межтрубном пространстве скважины, герметичности обсадных колонн, муфтовых или сварных соединений. Желательно избегать при освоении и эксплуатации скважины интенсивных воздействий на обсадную колонну, цементное кольцо и породы прискважинной зоны, в том числе многократной перфорации и проведения каких-либо взрывов, применения высоких давлений нагнетания выше гидроразрыва пласта, интенсивных откачек воды с выносом пластового материала, расширения диаметра прифильтровой зоны в условиях песчано-глинистого разреза.

12. Анализ фактических осложнений и предпосылок возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации действующих полигонов, сценариев гипотетических аварийных ситуаций показывает, что последствия осложнений и аварийных ситуаций

при захоронении промстоков и жидких РАО не могут носить характер катастроф, их воздействие ограничивается санитарно-защитными зонами, развитие осложнений и аварийных ситуаций протекает весьма медленно, предпосылки их возникновения могут быть обнаружены по данным контроля состояния геологической среды и инженерных сооружений.

Наибольшей потенциальной опасностью характеризуются инженерные системы — трубопроводы, скважины, насосное оборудование. Наиболее частыми причинами осложнений и аварийных ситуаций являются низкое качество выполненных работ (скрытые дефекты), ошибки персонала, непринятие своевременных мер по предупреждению развития осложнений.

Опыт эксплуатации полигонов захоронения подтвердил высокие изолирующие свойства собственно геологических формаций, которые являются надежнымместищем радиоактивных отходов.

6. КОНСЕРВАЦИЯ ПОЛИГОНОВ ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ РАО

Консервация является обязательным этапом технологии глубинного захоронения РАО, как жидких, так и отвержденных, и осуществляется для предупреждения отрицательного воздействия РАО после их захоронения на людей и среду их непосредственного обитания.

Основная цель консервации систем захоронения РАО — создание условий проживания и хозяйственной деятельности, не отличающихся или в наибольшей степени приближенных к нормальным, существующим на территориях, где захоронение не проводилось. Последующие поколения людей не должны испытывать каких-либо неудобств и тем более подвергаться воздействию ранее захороненных РАО.

Для достижения этой цели необходимо выполнение уже сформулированных требований (см. р. 3.1). Отходы должны быть локализованы в пределах установленных границ горного отвода недр, в пределах которого будут выполняться ограничения пользования недрами: запрещается бурение скважин или проходка горных выработок со вскрытием зон локализации отходов.

Поверхностные сооружения полигонов захоронения, включая трубопроводы, павильоны скважин, здания насосных станций и другие технологические сооружения, должны быть лик-

видированы или переоборудованы для использования в других целях. Буровые скважины полигонов захоронения, являющиеся каналами связи зоны локализации отходов с поверхностью, приводятся в состояние, исключающее проникновение компонентов отходов за пределы границ горного отвода недр.

Аналогичные подходы применяются и при консервации других объектов хозяйственной деятельности, связанной с использованием недр, в том числе мест разработок полезных ископаемых. Требования приведения природных условий в недрах к первоначальным не выдвигается, тем более что оно практически невыполнимо. В то же время поверхность должна быть приведена в состояние, позволяющее осуществлять различные виды деятельности.

При рассмотрении проблем консервации мест использования недр в различных целях, в том числе для захоронения РАО, необходимо учитывать, что полностью исключить влияние последствий предыдущей деятельности в недрах на условия существования последующих поколений вряд ли удастся. Так, будут действовать ограничения пользования недрами, что может сказаться на хозяйственном развитии территории. Немаловажным является и субъективный фактор — знание о существовании отходов в недрах и их потенциальной опасности может породить различные страхи, что снизит «качество жизни».

В связи с этим в местах захоронения и после их консервации должны проводиться компенсационные мероприятия, направленные на регулирование хозяйственной деятельности, проведение разъяснительной работы с населением.

Для решения последней задачи в районе захоронения РАО после проведения консервационных мероприятий организуется мониторинг геологической среды, включающий контроль состояния отходов, подземных вод, горных пород, поверхности. Результаты мониторинга позволяют получить объективную информацию, которая представляется местным административным органам, населению и используется для предупреждения развития социальной напряженности и других негативных последствий, обусловленных потенциальной опасностью отходов.

Мониторинг мест захоронения может включаться в состав федерального или регионального мониторинга природной среды, который должен осуществляться по всей территории государства или региона и охватывать все объекты окружающей природной среды, которые могут подвергаться какому-либо воздействию.

При планировании консервации полигонов захоронения жидких РАО рассматриваются три группы сооружений и природных объектов, входящие в систему захоронения и отличающиеся по характеру проводимых консервационных мероприятий:

- собственно отходы и их содержащие коллекторские горизонты, перекрывающие горизонты слабопроницаемых пород и буферные горизонты;
- буровые скважины полигонов захоронения;
- поверхностное оборудование.

В соответствии с основными принципами глубинного захоронения жидких РАО не требуется специальных консервационных мероприятий, проводимых в пласте-коллекторе. Выбор геологической формации, отвечающей определенным условиям, схемы и режимов захоронения отходов уже обеспечивают локализацию отходов в пределах горного отвода недр в течение устанавливаемого периода времени. Однако на стадии подготовки к консервации необходимо дополнительно доказать это положение с использованием данных контроля и исследования процессов захоронения отходов, их поведения в недрах на основе опыта эксплуатации полигона. Материалы эксплуатации должны быть использованы и для корректировки ранее установленных границ горного отвода недр, объем которого может быть уменьшен для послезаключительного периода, и, соответственно, снижены ограничения пользования недрами.

При прекращении эксплуатации полигона и нагнетания отходов картина протекающих процессов в недрах меняется. Давления на скважинах и положения уровней пластовых жидкостей для полигонов ГХК и СХК приближается к естественным, т. е. устанавливаются ниже поверхности земли. Для снятия подпора на нагнетательных скважинах полигона НИИАР, плотность удаляемых отходов которого ниже плотности пластовых рассолов, на завершающем этапе эксплуатации осуществляется нагнетание соледержащих растворов повышенной плотности, в качестве которых могут быть использованы подземные воды из удаленных наблюдательных скважин или буферного горизонта.

Уменьшение устьевого давления на скважинах и пластового давления в коллекторе ликвидирует или существенно уменьшает предпосылки вертикальных перетоков между пластом-коллектором и вышележащими горизонтами в районе скважин. Скорости движения компонентов отходов в поровом пространстве пласта-коллектора снижаются, что способствует переходу нуклидов и других компонентов отходов в тушниковые

поры и минеральный скелет пород пласта-коллектора, задержке нуклидов породами. Через 1—1,5 года после окончания нагнетания технологических слабокислых отходов, условно относимых к высокоактивным, начинает снижаться температура пласта-коллектора.

После окончания эксплуатации полигонов условия локализации отходов в пласте-коллекторе улучшаются. Тем не менее выдвигаются требования предусматривать в составе консервационных работ мероприятия по ограничению распространения отходов в наиболее опасных направлениях. Подобные требования обусловлены рядом обстоятельств, в том числе сомнениями в необходимых изолирующих свойствах геологических формаций, возникающих у специалистов и общественных деятелей, не представляющих себе специфику поведения РАО в условиях глубоких горизонтов, опасениями усиления современных геологических процессов, связанных с естественным развитием земной коры. Основанием для таких опасений является высказываемое в последние годы некоторыми учеными мнение об усилении тектонической активности, которое и может повлиять на условия изоляции отходов. По-видимому влияние будет происходить весьма замедленно в течение длительных периодов времени, оцениваемых тысячелетиями.

В связи с этим была начата разработка технологии создания противомиграционных завес или барьеров, которые могут рассматриваться также как противоаварийные мероприятия.

Анализ геологических условий полигонов захоронения жидких РАО и опыта проведения подобных мероприятий показал, что наиболее эффективно создание физико-химических (или геохимических, сорбционных) завес или барьеров, которые должны обеспечивать задержку миграции загрязнений породами без существенного нарушения естественного потока подземных вод или фильтрата отходов.

Создание противофильтрационных завес или экрана, преграждающих движение потока и кардинально меняющих его направление, не будет эффективно ввиду значительных объемов загрязнения и ширины потока, относительно больших глубин залегания коллектора.

Для создания физико-химических противомиграционных завес может быть осуществлена активизация естественных задерживающих свойств геологической среды и обработка пород пласта-коллектора нагнетанием различных растворов и газовых смесей через имеющиеся или специально сооружаемые скважины. Реагенты могут вводиться и непосредственно в контур отходов, вызывая образование осадков в поровом пространстве, захватывающих и соосаждающих нуклиды. В лабо-

раторных условиях был испытан ряд реагентов и газовых смесей, получены положительные результаты.

Буровые скважины полигонов захоронения являются наиболее ответственными сооружениями, от технического состояния которых во многом зависит надежность локализации отходов в недрах как при эксплуатации полигона захоронения, так и после его консервации. Скважины полигонов захоронения должны быть приведены в техническое состояние, обеспечивающее надежное разобобщение всех пересекаемых скважиной горизонтов. Эта задача является весьма трудной и ответственной, поскольку скважины являются инженерными сооружениями, конструктивные элементы которых изготовлены из материалов, практически не встречающихся в природных условиях геологических формаций ввиду недостаточной стойкости в течение длительных (геологических) периодов времени. Это утверждение относится прежде всего к обсадным трубам скважин, изготавливаемых из различных сплавов.

Для воссоздания в месте бурения скважин природных условий, которые обеспечивают надежную изоляцию отходов, необходимо применение материалов, в наибольшей степени близких по составу и свойствам естественным образованиям. Такими материалами являются цементы и бетоны различного состава, бентонит, цеолиты и им подобные. Тампонажные материалы на основе различного рода портландцементов, образующих цементные камни, содержат преимущественно минералоподобные вещества. Портландцементы широко применяются при креплении скважин.

В Московском инженерно-строительном институте под руководством проф. В. И. Сидорова была исследована коррозионная стойкость цементного камня, образованного из портландцемента, в условиях песчано-глинистых горизонтов, содержащих гидрокарбонатные воды с малой минерализацией. Такие условия характерны для слабопроницаемых, буферных и вышележащих горизонтов полигонов захоронения РАО СХК и ГХК. Изоляция этих горизонтов в интервалах выше пласта-коллектора должна быть достаточно надежной.

В результате была определена прогнозируемая глубина разрушения цементного камня под воздействием гидрокарбонатных подземных вод. Она составляет $7,7 \cdot 10^{-3}$ см за 100 лет. Установлено значительное затухание коррозионных процессов с течением времени. Коррозионные процессы в подземных водах данного состава протекают медленнее, чем в дистиллированной воде. Микропорометрические исследования показали, что после испытаний в цементном камне практически

отсутствуют поры опасных размеров. Это затрудняет диффузионные процессы.

Данные минерально-фазового анализа показывают, что со временем происходит дополнительная гидратация зерен цементного клинкера и нарастают процессы кристаллизации гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Указанные процессы приводят к дальнейшему увеличению прочности при сжатии цементных образцов по мере воздействия на них гидрокарбонатных сред. Это связано, во-первых, с уменьшением пористости цементного камня за счет коагуляции пор карбонатом кальция; во-вторых, переходом гидросульфатоалюминатов кальция в гидрокарбоалюминаты кальция за счет замещения в сложившейся постоянной микроструктуре, что препятствует возникновению внутренних напряжений в цементном камне и его деформациям.

Стойкости цементного камня в указанных условиях благоприятствуют постоянные температура и влажность в глубоких горизонтах, залегающих выше пласта-коллектора, контактирующих с цементным камнем и сохраняющихся в течение столетий и тысячелетий.

Институтом Физической химии исследовалась устойчивость различных тампонажных материалов с учетом радиационного, химического и термического воздействия отходов, т. е. для интервалов пластов-коллекторов, содержащих компоненты отходов. Установлено, что для этих условий целесообразно использовать поликонденсационные органические композиции — термореактивные клеи, эпоксидные и полиэфирные клеи на основе эпоксидных смол, фурфурол — катионовые смолы, фурано-эпоксидные смолы.

Определенный интерес вызывает использование альтинов, получаемых на базе продуктов сланцехимии. Альтины входят в состав полимербетонов, сочетающих свойства органических и неорганических вяжущих.

К числу новых перспективных веществ относится полимин, синтезированный в Институте механики МГУ, представляющий собой соединение бентонитовой глины и высокомолекулярного полимера. Исследования тампонажных материалов продолжаются.

Большое значение для обеспечения надежности консервации скважин имеет собственно технология консервации, которая должна обеспечивать доставку тампонирующего материала в наиболее ответственные участки затрубного пространства и ствола скважины.

Консервация глубоких скважин, в том числе нефтяных, газовых и скважин другого назначения, является широко распространенной операцией и именуется обычно ликвидацией. Имеются нормативно-методические документы, утвержденные Госгортехнадзором, в которых предусмотрены требования к ликвидации различных скважин, в том числе и специальных, использовавшихся для захоронения стоков [62]. Однако высокая потенциальная опасность РАО требует разработки специальных технологий.

Консервации (ликвидации) скважин полигона захоронения жидких РАО должно предшествовать ее обследование с целью установления степени кольматации пласта-коллектора, состояния цементного камня в затрубном пространстве, целостности колонны и т. д. Применяется комплекс геофизических и гидро-геологических методов, включающий термометрию, акустическую цементометрию, радиоактивный каротаж, определения положения уровней подземных вод и изменений геофизических характеристик в пласте-коллекторе и вышележащих горизонтах при нагнетании отходов и индикаторных растворов, отбор проб и анализ пластовых жидкостей. При сложных случаях рядом с ликвидируемой возможно бурение специальной контрольной скважины. Результаты обследования позволяют обосновать соответствующую технологию ликвидации.

Одним из первых этапов ликвидации скважины является нагнетание в пласт-коллектор, содержащий отходы, кольматирующих растворов, которые образуют практически непроницаемую зону в пласте-коллекторе на расстояниях первых метров от скважины. Благодаря этому отходы или их фильтрат в последующем не будут контактировать со скважиной и тампонирующими материалами.

Технология тампонирования скважины определяется ее конструкцией и техническим состоянием. На СХК при проведении планово-предупредительного ремонта была осуществлена опытная ликвидация ряда скважин полигонов захоронения.

Ликвидируемые скважины могут быть разделены на две основные группы: с удовлетворительным состоянием цементного камня в затрубном пространстве и надежной изоляцией пласта-коллектора от вышележащих горизонтов и скважины, которые требуют при ликвидации дополнительной изоляции затрубного пространства.

Ликвидация скважин первой группы не вызвала особых сложностей. Для ликвидации скважин второй группы потребовалось применение особой технологии, которая проиллюстрирована рис. 42.

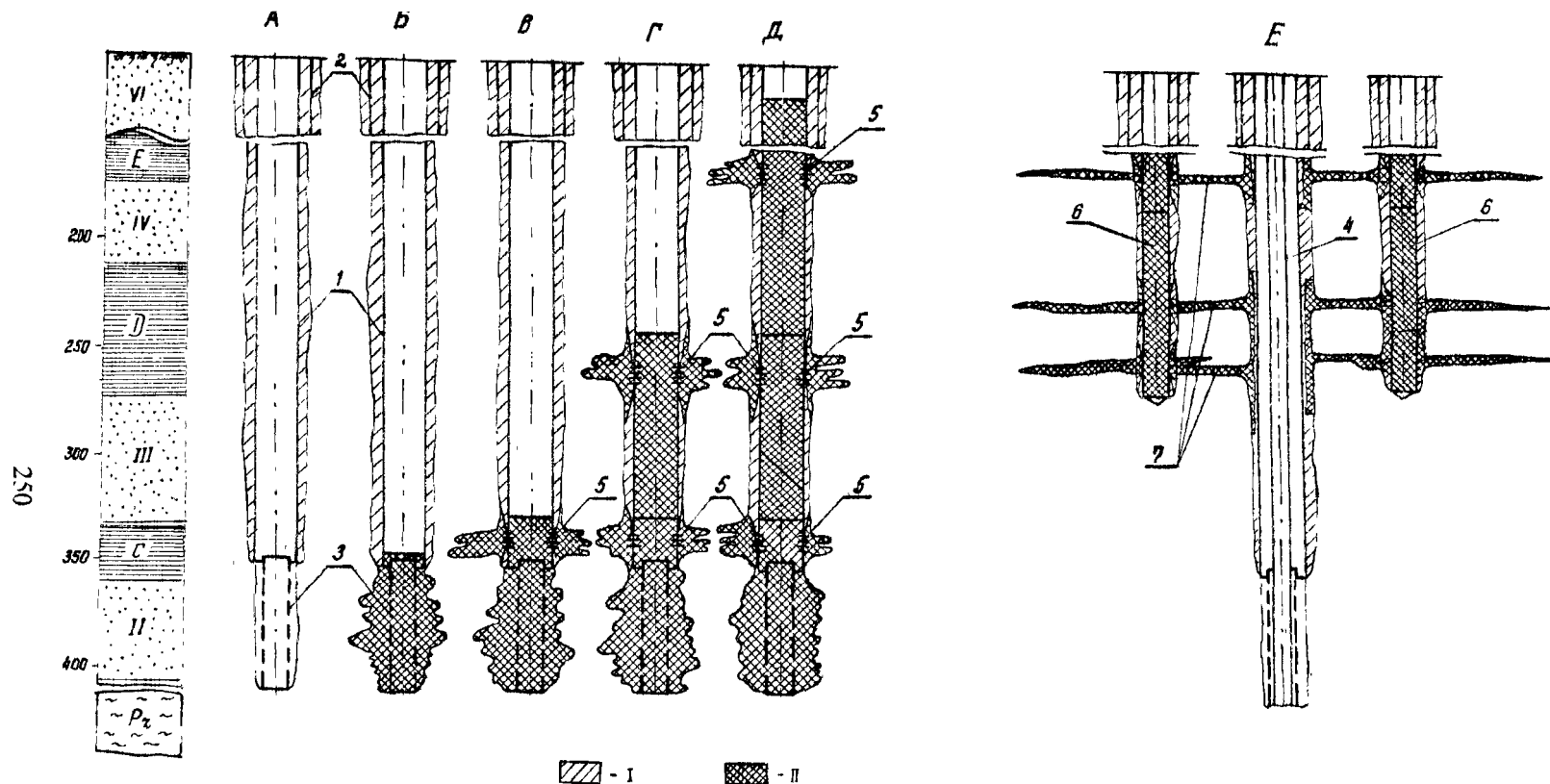


Рис. 42 Схема ликвидации скважин полигонов захоронения жидких РАО.

А—ликвидируемая скважина; Б—заполнение цементным раствором фильтровой зоны скважины; В, Г, Д—перфорация колонны в нижней, средней и верхней части и нагнетание цементного раствора в режиме гидроразрыва пласта; Е—ликвидация с использованием инъекционных скважин. 1—обсадная эксплуатационная колонна; 2—кондуктор; 3—фильтровая колонна; 4—лифтовая или измерительная колонна; 5—интервалы перфорации; 6—инъекционные скважины; 7—трещины гидроразрыва пласта. I—цементный камень, созданный при сооружении скважины; II—цементный камень, сформировавшийся при ликвидации скважины.

В скважинах, в которые был возможен доступ глубинными приборами, осуществлялась кумулятивная перфорация обсадных колонн в заранее выделенных интервалах слабопроницаемых пород и нагнетание тампонирующей смеси в режиме гидроразрыва пласта. В результате цемент проникал в затрубное пространство и в слабопроницаемые породы, образуя в них горизонтальные круговые экраны. Распределение образующегося цементного камня контролировалось по объемам удаленного цементного раствора и комплексом геофизических и гидродинамических методов. В районе скважины образовывалось монолитное тело цементного камня, включающего обсадные трубы скважины, внутреннее пространство которых также было заполнено цементным камнем. Горизонтальные экраны цементного камня дополнительно изолируют пласт-коллектор от вышележащих горизонтов.

Для скважин, доступ во внутреннее пространство которых может быть затруднен, например, из-за высокой загрязненности, была опробована технология тампонирования с использованием инъекционных скважин, сооружаемых на расстояниях 10—15 м от ликвидируемых и вскрывающих вышележащие горизонты. Нагнетание цементного раствора выполнялось в режиме гидроразрыва пласта в интервалах слабопроницаемых пород. По данным контрольных наблюдений установлено образование круговых экранов, достигших ствола ликвидируемой скважины с заполнением участков ее затрубного пространства.

Консервация комплекса поверхностных сооружений полигона захоронения представляет, очевидно, более легкую задачу, чем, например, сооружений АЭС и радиохимических производств, технология консервации которых также разрабатывается в настоящее время.

Окончательным этапом консервации полигона захоронения жидких РАО является реабилитация территории, которая также не будет сопряжена со значительными сложностями ввиду отсутствия или весьма малой загрязненности почв, связанной с эксплуатацией полигонов.

Необходимо подчеркнуть, что на момент подготовки данной книги технология полигонов захоронения жидких РАО находится в стадии исследований и разработки. Прежде чем будет выполнена подготовка проектов консервации, необходимо провести широкомасштабные комплексные исследования, опытные и опытно-промышленные работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным итогом глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов является предотвращение их воздействия на население в районах трех крупных предприятий атомной промышленности, на животный мир и растительность, поверхностные и неглубокозалегающие грунтовые воды. Сотни, а может быть, и тысячи людей поколений 60—80-х годов, а также последующих поколений избавлены от дополнительных доз облучения, тем самым здоровье этих людей сохранено, а жизнь продлена.

Отходы, содержащие сотни миллионов кюри радиоактивных веществ, локализованы в геологической среде в пределах санитарно-защитных зон и горных отводов недр. Подавляющая часть радиоактивных нуклидов находится в горных породах в твердой фазе — в виде сорбата и слаборастворимых соединений, образовавшихся в результате физико-химических процессов.

Строение и свойства геологической среды в местах захоронения, ее способность вмещать и локализовать отходы хорошо изучены при предваряющих захоронение геолого-разведочных работах и исследованиях, а также непосредственно при проведении захоронения, что позволяет достаточно уверенно прогнозировать дальнейшее поведение отходов.

Состояние отходов и вмещающих их геологических формаций контролируется проведением комплексных наблюдений и измерений, результаты которых позволяют подтверждать безопасность мест захоронения, при необходимости принимать меры по дополнительной изоляции отходов. Тем самым осуществляется мониторинг геологической среды в местах захоронения.

Возможные осложнения и аварийные ситуации при осуществлении захоронения не могут иметь катастрофических последствий, связанных с крупномасштабным воздействием на экосистемы, атмосферу и поверхностные воды.

Изъятие из возможного использования участков геологической среды, содержащих отходы, не приведет к значимым потерям природных ресурсов, поскольку эти участки не обладают какими-либо особо ценными свойствами, не содержат дефицитных полезных ископаемых, крупных запасов подземных вод.

Имеется возможность проведения эффективных консервационных мероприятий после завершения захоронения отходов.

Опыт глубинного захоронения жидких РАО, наблюдения за распространением отходов и сопутствующими процессами представляют интерес для использования в других областях практической деятельности: захоронение отвержденных отходов в слабопроницаемых геологических формациях, борьба с загрязнением подземных вод и прогнозирование последствий загрязнения, разработка месторождений полезных ископаемых.

Развитие технологий переработки и отверждения жидких радиоактивных отходов, сопровождающихся их концентрированием и уменьшением объемов, позволит в последующем отказаться от глубинного захоронения радиоактивных отходов в жидком виде. Хранение отвержденных отходов на поверхности в специальных сооружениях и глубинное захоронение могут быть достаточно безопасными. Однако не следует исключать возможность захоронения при благоприятных условиях некоторых видов жидких радиоактивных отходов, например содержащих тритий и другие нуклиды с небольшими периодами полураспада.

Глубинное захоронение нерадиоактивных промышленных отходов (промстоков) является эффективным способом предупреждения загрязнения поверхностных водоемов и водотоков, особенно в регионах со сложной экологической обстановкой и для производств, отходы которых не могут быть обезврежены другими способами. Такой вид обращения с отходами широко применяется в США, начинает развиваться и в России. Опыт глубинного захоронения жидких РАО, вкратце освещенный в книге, будет безусловно интересен для решения этой сложной проблемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труды второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1959. Избранные доклады иностранных ученых. Радиобиология и радиационная медицина. Москва, 1959 г.
2. A. Cleboch, Jr. and E. H. Baltz. Progress in the Unites States of America toward Deep-well Disposal of Zigvid and Gaseous Radioactive Wastes. Proceedings of a Symposium. Disposal of Radioactive Wastes into the Ground IAEA, Vienna, 1967.
3. Disposal of radioactive grauts into hydranlically fractured shale. Techn. reports series № 232. Vienna, 1983.
4. Robertson I. B. Digital modeling of radioactive and chemical waste transport in the snake River Plain agvifer at the national Reactor Testing Station, Idaho. U. S. Geob. Survey Open-File Report DO-22054. 1974.
5. Временные санитарные правила и технические условия устройства и эксплуатации полигонов подземного захоронения радиоактивных жидких отходов (ВСП и ТУ ПЗ-79). Москва, 1979 г.
6. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87. Москва ЭАИ, 1988 г.
7. Waste isolation safety assesment program, Nov. Et-76-C-06-1830.
8. Г. Б. Полуэктова, Ю. В. Смирнова, И. Д. Соколова. Обработка и удаление радиоактивных отходов предприятий атомной промышленности зарубежных стран. Обзор ЦНИИАтоминформ. Москва, 1990 г.
9. Standartisation of radioactive waste Catedories. Technical reports series № 101, IAEA, Vienna, 1970.
10. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО085) СанПиН 42-129-11-3938-85, Москва, 1986 г.
11. А. С. Никифоров, В. В. Куличенко, М. И. Жихарев. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. ЭАИ, Москва, 1985 г.
12. Site investigations for repositories for solid radioactive wastes in deep continental geological fotmations. Techn. reports series № 215. IAEA, Vienna. 1982
13. Environment Commnuttee report. Atom 1986, № 355. P. 18.
14. В. И. Землянухин, Е. И. Ильенко, А. Н. Кондратьев, Л. Н. Лазарев, А. Ф. Царенко, Л. Г. Царнына. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. М., Энергоатомиздат, 1983 г.
15. В. В. Громов, Б. Н. Судариков, В. И. Савельева, Э. Г. Раков, В. А. Зайцев. Химическая технология облученного ядерного горючего. М., Атомиздат, 1971.
16. Государственная программа Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона и мерах по оказанию помощи пострадавшему населению на период до 1995 г. Москва, 1993 г.

17. S. I. Beard, W. L. Codfrey. Waste disposal into the ground at Hanford. Disposal of Radioactive Wastes into the Ground. IAEA, Vienna, 1967.
18. H. Brücher. Contributions to the Risk Evaluation of a High-ZeVl waste solidification plant. nuclear Technology. vol 39, 1978.
19. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите. Публикация 2. М., ГАИ, 1961.
20. Доклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации. A/5216. Нью-Йорк, апрель, 1962 г.
21. Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High level Radioactive wastes. Safety series № 90. IAEA safety standards 1989.
22. Н. И. Плотников. Подземные воды — наше богатство. Москва, Недра, 1990 г.
23. Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л., Недра, 1979 г.
24. Гольдберг В. М., Скворцов Н. П. Проницаемость и фильтрация в глинах. М. Недра, 1986.
25. Гаврилов В. П. Происхождение нефти. М., Недра, 1986 г.
26. Нефтяные и газовые месторождения СССР. Справочник. М., Недра, 1987.
27. Современные методы изучения и прогноза покрышек нефти и газа. Минск, 1981.
28. Прозорович Г. Э. Покрышки залежей нефти и газа. М., Недра, 1972.
29. Ковалев В. С., Житомирский В. И. Прогноз разработки нефтяных месторождений и эффективность систем заводнения. М., Недра, 1976 г.
30. Евсеева И. Е., Перельман А. И., Иванов К. Е. Геохимия урана в зоне гипергенеза. М. А. И., 1974 г.
31. Современные движения земной коры. М., Наука, 1987 г.
32. Пояснительная записка к карте неотектонического районирования Нечерноземной зоны РСФСР. М. 1:1500000, Мингео РСФСР, МГУ, 1983 г.
33. Никонов А. А. Землетрясения. Прошлое, современность, прогноз. М., Знание, 1984 г.
34. Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М., Мир, 1988.
35. Эйби Д. А. Землетрясения. М., Недра, 1982.
36. Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты. М., Недра. 1976 г.
37. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков. М., Недра, 1993 г.
38. Investigation of sorption and migration of radionuclides in soils and rocks of different compositions. Proceed. of a symp. Disposal of R. W. into the Ground. IAEA. Vienna. 1967.
39. Shokei kato and Hajimu Jabuta. Distribution coefficients used for safety assessment for shallow land R. W. burial. Nihon Geushiryoku Gakkaishi, 28(4).
40. Кузнецов Ю. В., Щebetковский В. Н. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. М., Атомиздат, 1974.
41. Тарасевич Ю. И., Овчаренко Ф. Д. Адсорбция на глинистых минералах. «Наукова думка», Киев, 1975 г.
42. Ольховик Ю. А., Соботович Э. В. Перенос радиоактивных нуклидов в процессе фильтрации из водоема. Ж. Водные ресурсы/ 6, 1990 г.

43. Assessment of migration pathways. Techn. symp of stand. for High — Zevel R. W. management. EPA Contract № 68-01-4470. 1977.
44. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949 г.
45. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. Гостоптехиздат, 1959.
46. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Гостехтеориздат, 1952.
47. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений. М., Недра, 1976.
48. Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы движения загрязненных подземных вод. М., Недра, 1973.
49. Мироненко В. А. Динамика подземных вод. М., Недра, 1983 г.
50. Лукнер Л., Шестаков В. М. Моделирование миграции подземных вод. М., Недра, 1986.
51. Веригин Н. Н. О складировании жидких продуктов и отходов промышленности в пористо-трещинных горных породах. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, № 10, 1968.
52. Костин П. П. Некоторые особенности гидрогеологических процессов при подземном захоронении промстоков. Известия ВУЗов, Геология и разведка, № 11, 1989.
53. Белицкий А. С. Охрана окружающей среды при подземном захоронении промстоков. М., Недра, 1976.
54. Лукиер Л., Шестаков В. М. Моделирование геофильтрации. М., Недра, 1976.
55. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Опыт-но-миграционные работы в водоносных пластах. М., Недра, 1986.
56. Добрынин В. М., Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М., Недра, 1970.
57. Кедровский О. Л., Рыбальченко А. И., Пименов М. К. и др. Принципы оценки надежности подземного захоронения радиоактивных жидких отходов в глубокие геологические формации и пути ее повышения (в кн. Underground disposal of radioactive Wastes. I.A.E.A, Veinna, 1980).
58. Надежность в технике. Термины и определения. ГОСТ 27004 — 85.
59. Охрана окружающей среды. Постатейный комментарий к закону России. Законодательство и экономика №№ 16, 17(38), 1992 г.
60. Спицын В. И., Пименов М. К. и др. Основные предпосылки и практика использования глубоких водоносных горизонтов для захоронения жидких радиоактивных отходов. ж. Атомная энергия, т. 44. в. 2, 1978.
61. Кедровский О. Л., Рыбальченко А. И., Пименов М. К. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов в пористые геологические формации. Атомная энергия, т. 70, вып. 5, 1991 г.
62. Мирошников И. Что же произошло в Димитровграде? Ульяновская правда. 6.10.90 г.
63. Страхов В. Н., Мосинец В. Н. и др. А ядерных землетрясений не было. Ульяновская правда. 01.12.90.
64. Положение о порядке ликвидации нефтяных, газовых и других скважин и списания затрат на их сооружение. Утверждено Госгортехнадзором 27.12.1989 г.
65. Гидрогеологическое прогнозирование. М., Мир, 1988.

Научное издание

**Андрей Иванович Рыбальченко
Михаил Козьмич Пименов
Петр Петрович Костин
Валентина Дмитриевна Балукова
Анатолий Викторович Носухин
Евгений Ильич Микерин
Николай Николаевич Егоров
Елена Павловна Каймин
Инэсса Михайловна Косарева
Виталий Михайлович Курочкин**

ГЛУБИННОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Технический редактор Г. Н. Морозова
Корректор М. Д. Штрамель

Сдано в набор 5.04.94	Подписано в печать 22.08.94	Форм. 60 × 84/16
Бум. офсетная	Гарнитура Таймс	Офсетная печать
Объем 16 п. л.	Тираж 2000 экз.	Зак. тип. № 64
		Изд. № 034 С-034

Набрано и отпечатано в типографии ИПО «Полигран» 125438, Москва, Пакгаузное ш., 1