

И. М. Мелькановицкий, Г. С. Вартанян, З. А. Водоватова

**МЕТОДИКА
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**



И. М. Мелькановицкий, Г. С. Вартанян, З. А. Водоватова

МЕТОДИКА
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД



Москва «Недра» 1978

Мелькановицкий И. М., Вартанян Г. С., Водоватова З. А.
Методика геофизических исследований при поисках и разведке
минеральных вод. М., «Недра», 1978, 173 с.

В книге приведены сведения о месторождениях минеральных вод и задачах геологоразведочных работ; дана характеристика полевых и скважинных методов геофизических исследований; рассмотрены методика геофизических наблюдений и приемы гидро-геологической интерпретации геофизических данных. Проанализированы особенности методики геофизических исследований при поиске и разведке различных типов месторождений минеральных вод. Методические рекомендации подтверждены практическими примерами геофизических работ, охватывающими все важнейшие провинции минеральных вод СССР: Русскую платформу, Закарпатье, Кавказ, Тянь-Шань, Забайкалье, Камчатку и др.

Работа рассчитана на геофизиков и гидрогеологов, ведущих поиски и разведку минеральных, термальных и промышленных вод, среднемасштабные гидрогеологические съемки и составляющих прогнозные мелкомасштабные гидрогеологические карты.

Табл. 12, ил. 21, список лит. — 85 назв.

Полевые и скважинные геофизические методы для поисков и разведки минеральных вод систематически стали применяться с 30-х годов. Инициатором и непосредственным исполнителем этих первых в СССР исследований был Александр Николаевич Огильви — крупный гидрогеолог, внесший большой вклад в изучение гидрогеологии минеральных вод страны. На самом первом этапе привлечения геофизики для гидрогеологических исследований А. Н. Огильви показал необходимость комплексного использования этих методов. В дальнейшем существенный вклад в развитие этого направления внесли Л. В. Горбушина, В. Н. Дахнов, Д. И. Дьяконов, И. М. Зайцев, Н. Н. Непримеров, А. А. Огильви, Н. А. Огильви, В. Е. Сидоров, В. О. Урысон, А. И. Хребтов и др.

В настоящее время при изучении различных типов месторождений минеральных вод с помощью геофизических работ удается добиться определенных успехов. Примеры таких исследований приводятся в настоящей работе.

Несмотря на то, что объем поисков и разведки минеральных вод ежегодно увеличивается, до последнего времени в литературе мало уделялось внимания применению геофизических методов при исследованиях минеральных вод. Специальных руководств еще не создано, между тем геофизические исследования в этом случае очень своеобразны и стандартный подход к решению задач не всегда приводит к положительным результатам. Особенно остро чувствуется отсутствие методического руководства, в котором был бы обобщен опыт и даны рекомендации, основанные на новейших достижениях разведочной геофизики. Все это побудило авторов написать настоящую книгу.

В основу ее положен многолетний опыт геофизических исследований в СССР и за рубежом при поисках и разведке минеральных вод, а также личный опыт работы авторов. Учтены приемы геофизических исследований в гидрогеологии при решении указанных задач [48, 50, 56]. Привлечены материалы по применению геофизики при региональном прогнозировании, поисках и разведке нефтяных, рудных, нерудных и других полезных ископаемых [2, 8, 15, 37, 40, 76, 79]. Использованы рекомендации и руководства, предназначенные для гидрогеологических методов поисков и разведки минеральных, термальных, промышленных и пресных вод [12, 13, 15, 49, 53, 66, 82].

В книге изложены краткие сведения о гидрогеологии месторождений минеральных вод, дана характеристика полевых и скважинных методов, уделено большое внимание их комплексированию и приемам специализированной интерпретации. Рас-

смотрены также особенности методики геофизических исследований главнейших типов месторождений минеральных вод.

В настоящей книге геофизические методы рассмотрены И. М. Мелькановицким и З. А. Водоватовой; раздел, посвященный гидрогеологии, написан Г. С. Вартаняном, с ним же обсуждались геофизические разделы с точки зрения гидрогеологической направленности.

Авторы выражают благодарность за помощь в работе над книгой Н. А. Огильви, М. Н. Байсаровичу, В. А. Богословскому, Е. В. Поповой, А. К. Сабитову, С. А. Шмарьяну.

I. ГИДРОГЕОЛОГИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Общая характеристика и типизация месторождений минеральных вод

Месторождением подземных минеральных вод называется пространственно ограниченная часть гидравлически взаимосвязанных трещинно-жильных систем или пластовых (трещинно-поровых, поровых) коллекторов, где воды по своему химическому составу, нагретости и другим свойствам соответствуют нормам курортологического использования или промышленного разлива, а по гидрогеолого-экономическим показателям могут быть объектом эксплуатации.

В гидрогеологическом отношении месторождения минеральных вод представляют собой части водонапорных систем, приуроченных к водоносным горизонтам (комплексам) или к обводненным зонам дробления пород.

Месторождение минеральных вод имеет геологические и гидрохимические (иногда гидротермические) границы. Геологические границы определяются наличием водонепроницаемых литолого-фациальных или тектонических экранов, которые изолируют минеральную воду от других вод водоносной системы. Гидрохимические границы определяются теми величинами минерализации воды, концентраций отдельных компонентов, температуры, за пределами которых свойства воды не соответствуют кондициям, установленным для данного полезного ископаемого. Гидрохимические границы месторождения обычно тесно связаны с гидродинамическими условиями, складывающимися на конкретный период в данной водонапорной системе.

Контуры месторождений минеральных вод, особенно если они не имеют хорошо выраженных геологических границ, меняются в зависимости от сезонных и более длительных климатических колебаний, а также от величины отбора минеральной воды из месторождения или от каких-либо других искусственных причин, обуславливающих изменение гидродинамических условий. Эти изменения в первую очередь характерны для месторождений минеральных вод неглубокого залегания, влияние климатических факторов на которые особенно сильно. Известны примеры стягивания или расширения контура кондиционных минеральных вод на некоторых месторождениях Сибири, Дальнего Востока, Кавказа и других районов страны в зависимости от интенсивности поступления атмосферных осадков в водоносный горизонт или в зону.

Изменение геологических границ месторождения связано с историей развития геологической структуры района, т. е., как правило, оно происходит в течение весьма длительных промежутков времени. Причем в зависимости от господствовавшего в регионе режима геологического развития формируются водоносные коллекторы различных мощностей и распространенности. Так, в регионах распространения осадочных комплексов, в целом характеризуемых горизонтальным или слабо наклонным залеганием, аномальные гидрогеологические условия проявляются в отдельных складчатых структурах, так как здесь обычно развиты разнообразные разрывные межпластовые и секущие деформации, оказывающие ведущее влияние на формирование характера и направления подземного потока.

В этих зонах условно-сплошной подземный поток рассекается на изолированные «струи», тяготеющие к отдельным тектонически ослабленным зонам; в замковых частях складок, а также в пределах зон преимущественного развития секущих нарушений в движении подземных вод приобретает главенствующую роль вертикальная составляющая; здесь широко отмечаются процессы перетекания, смешения вод различных горизонтов и др. В горно-складчатых регионах основными путями восходящего движения глубинных минеральных вод являются всевозможные разрывные структуры (бросы, сдвиги и др.), а также контакты пород различных литологических разностей.

В случае образования тектонических нарушений наиболее благоприятная среда для локализации минеральных вод формируется в известняках, на контакте известняков с пластичными породами, в интрузивных образованиях и песчаниках. Менее благоприятная обстановка для фильтрации подземных вод по тектоническим нарушениям создается в сланцах, филлитах и роговиках.

Комбинация структур создает различные условия для сохранения и движения минеральных вод в недрах. Если в платформенных регионах мы имеем сравнительно простые геолого-структурные условия, а следовательно, простую гидродинамику и легко изучаемые гидрогеологические условия территории, то в горно-складчатых областях появляются свои особенности. Здесь хорошо выраженные пластовые системы в большинстве случаев сменяются гидрогеологическими массивами с многочисленными трещинно-жильными водонапорными системами. Естественно, что в совершенно различных коллекторах и различных условиях восполнения подземных вод, каких существуют в регионах со спокойным залеганием водоносных толщ и горно-складчатых системах, должны складываться и специфические для каждого из них гидродинамические условия.

Отсюда следует, что в каждом из рассматриваемых случаев потребуется индивидуальный подход при изучении того или

иного месторождения минеральных вод, при выборе тех или иных геологоразведочных методов и приемов. В одних случаях, например в пределах крупных платформенных артезианских бассейнов (с учетом сравнительно небольших отборов минеральных вод), необязательно разбуривать все месторождение минеральной воды, протяженность которого часто составляет сотни километров. В других случаях, подобных упомянутым выше зонам дробления пород (нередко являющимся местом формирования ценной минеральной воды), бывает необходимо проводить скрупулезное изучение площади с применением самых разнообразных средств: геофизики, бурения, горных работ, химии, опытных опробований и др. Кроме того, упруговодонапорный режим, присущий некоторым типам месторождений (следствием чего является наличие здесь значительных упругих запасов минеральной воды), обусловливает специфичность методов оценки их эксплуатационных запасов, что также существенно отличает разведочные работы от таковых на месторождениях, где упругий режим не наблюдается.

С учетом сказанного выше рассмотрим основные типы месторождений минеральных вод. В приводимой классификации в качестве основного показателя для выделения самостоятельных групп принимаются тип и степень изолированности коллектора. По этому признаку все месторождения минеральных вод делятся на три группы водоносных систем: 1) водонапорную пластовую; 2) водонапорную жильную; 3) безнапорную.

В первой группе выделяются три самостоятельных типа (I—III) месторождений, отличающихся друг от друга по размерам, величинам эксплуатационных запасов, избыточных напоров и другим показателям. В данном случае уже проявляются различия между водоносными системами с однотипными коллекторами, но отличающимися друг от друга граничными условиями. В водонапорных жильных системах мы сталкиваемся с двумя типами (IV, V) месторождений минеральных вод. Наконец, среди безнапорных водоносных систем можно выделить один тип (VI) месторождений минеральных вод [12, 13].

I. Месторождения минеральных вод, приуроченные к платформенным артезианским бассейнам. Накопленный в настоящее время фактический материал обеспечивает информацией о месторождениях в платформенных артезианских бассейнах настолько, что не возникает необходимости вести здесь специальные поисковые работы по выявлению того или иного месторождения. Как правило, это удается делать на основе имеющихся гидрохимических и других карт.

Для таких месторождений характерны значительные площади распространения минеральных вод одного состава, высокие избыточные напоры, достигающие нескольких десятков метров и соответственно обеспечивающие самоизлив. Большие площади развития минеральных вод определенного состава, значитель-

ные емкости водоносных горизонтов, наличие упругих запасов способствуют тому, что при опытных откачках (выпусках), а впоследствии и при эксплуатации, в большинстве случаев мы имеем неизменный химический состав отбираемых минеральных вод, т. е. данный тип месторождения оказывается сравнительно просто изучаемым.

При довольно хорошей выдержанности горизонтов-коллекторов по площади и малой их дислоцированности, на таких месторождениях сравнительно легко прогнозировать местоположение водоносного горизонта для любой точки площади. В связи с этим задачу по выведению минеральной воды определенного состава на месторождениях рассматриваемого типа можно успешно решить путем бурения одиночных скважин. В настоящее время почти для всех платформенных артезианских бассейнов составлены мелкомасштабные карты, на которых отображена пьезометрическая поверхность подземных вод. В связи с этим, используя гидрохимические характеристики территории, а также данные по пьезометрическим напорам, можно получить материалы, которые позволяют локализовать площади проведения геологоразведочных работ¹. Для изучения гидрогеологических условий рассматриваемых месторождений используют геофизическую разведку, бурение, откачки (выпуски), глубинные опробования. Эксплуатационные запасы минеральных вод этих месторождений (при условии значительной удаленности водозаборного сооружения от границы некондиционных вод) можно оценить гидродинамическими методами.

II. Месторождения минеральных вод предгорных и межгорных артезианских бассейнов и артезианских склонов. Отличительная черта месторождений этого типа — весьма высокие избыточные напоры, часто достигающие сотен метров. Большие перепады высот создают в этих районах предпосылки для установления значительных величин гидравлических градиентов, что, в свою очередь, при прочих равных условиях приводит к увеличению действительных скоростей движения минеральных вод в недрах. В соответствии с этим месторождения минеральных вод этого типа имеют меньшие протяженности, чем на платформах, — гидрохимические пояса узки в плане.

Другой характерной чертой названной группы месторождений, связанной с геолого-тектоническими и геотермическими особенностями глубоких недр, являются нередко весьма высокие газонасыщенность и нагретость минеральных вод. Например, в Ессентукской опорной скв. 1 на глубинах порядка 1200 м было зафиксировано в воде до 40 г/л углекислого газа. Мине-

¹ Эти площади выбираются также с учетом других показателей, таких, как близость месторождений к местам потребления, климатические факторы и др.

ральные воды месторождений предгорных и межгорных бассейнов в отличие от месторождений платформенного типа характеризуются меньшей стабильностью химического и газового состава при откачках. В этих случаях, особенно при больших понижениях уровня воды, возможно привлечение к скважине вод иного состава из других горизонтов через многочисленные тектонически ослабленные зоны, всевозможные литолого-фациальные окна, а в некоторых случаях и через водоупорные прослои. Кроме того, высока степень вероятности быстрого перемещения к водозабору гидрохимической границы (фрона между кондиционными и некондиционными водами).

Водоносные горизонты в пределах этих месторождений легко прослеживаются в пространстве. Для месторождений этого типа гидравлический метод оценки эксплуатационных запасов преобладает над гидродинамическим. Общий характер разведочных работ в целом тот же, что и на месторождениях платформенного типа, — наиболее целесообразно бурить и опробовать одиночные скважины. Однако в некоторых случаях необходимо разбуривать небольшую группу скважин и тщательно ее опробовать.

III. Месторождения зон разгрузки минеральных вод в горизонты напорных вод (гидроинжекционный тип). Названные месторождения имеют много общих черт с месторождениями V типа, поэтому главнейшие их особенности будут изложены несколько ниже. Отметим лишь, что в отличие от месторождений V типа, месторождения зон разгрузки в горизонты напорных вод характеризуются упруго-водонапорным режимом и здесь можно ожидать наличие значительных запасов минеральных вод.

IV. Месторождения трещинно-жильных минеральных вод в кристаллических массивах. Это довольно распространенная группа месторождений минеральных вод, связанных с магматогенно-метаморфическими массивами, характеризуется обычно очень ограниченными сечениями основных водоносных зон и соответственно наличием сосредоточенных потоков минеральных вод. Эти зоны, как правило, генетически связаны с тектоническими процессами, реже обусловлены процессами карстования пород. Ввиду того, что одно и то же тектоническое нарушение в различных частях имеет различные проницаемости (что связано с притертостью стенок или открытостью его полостей, наличием или отсутствием минеральных заполнителей) и в массивах рассматриваемого порядка существует большое количество взаимно пересекающихся тектонических нарушений, пути движения минеральных вод очень сложны.

Для выявления водоносных трещинных зон иногда необходимо проводить комплекс работ, включающий площадные геофизические исследования, геофизические исследования разреза в разведочных скважинах, массовые глубинные опробования сква-

жин и др. Успешное выявление водоносных зон и последующая оценка эксплуатационных запасов возможны при постановке площадных геологоразведочных работ. Подсчет эксплуатационных запасов минеральных вод в этом случае осуществляется гидравлическим способом.

V. Месторождения участков разгрузки минеральных вод в зоны развития грунтовых потоков (гидроинжекционный тип). Этот наиболее сложный тип месторождений минеральных вод (прежде всего в геолого-структурном и гидродинамическом отношении) обнаруживается в местах сопряжения гидрогеологически активных тектонических нарушений с другими водоносными зонами и горизонтами. Такие месторождения имеют широкое распространение в магматогенно-метаморфических массивах, где к верхней элювиальной трещинной зоне обычно приурочены пресные грунтовые потоки и в них по тектоническим нарушениям разгружаются минеральные воды. К этому же типу относятся месторождения зон разгрузки минеральных вод по нарушениям в замковых частях сильно разрушенных антиклинальных структур и др. Во всех случаях разгружающиеся по тектоническому нарушению минеральные воды приводятся в контакт с водами иного состава, движущимися в зоне или горизонте, куда осуществляется разгрузка. Вследствие этого в зонах таких сопряжений существует подвижное равновесие между водами с различным химическим составом, благодаря чему опытные гидрогеологические и разведочные работы нарушают первоначальные гидродинамические соотношения и часто приводят к сильному искажению фактически существующей на глубине картины. Установлено, что на таких месторождениях внедрение сосредоточенных глубинных потоков закономерно приводит к формированию в грунтовом водоносном горизонте устойчивого во времени гидродинамического купола, венчающего гидрогеологически активное тектоническое нарушение.

Разведка месторождений гидроинжекционного типа (III, V) наиболее сложна и требует проведения широкого комплекса исследований с привлечением методов геофизической разведки, гидрогеологических опытных работ (включая глубинные опробования), гидрохимического анализа и др. В этих случаях целесообразна площадная разведка территории.

VI. Месторождения грунтовых минеральных вод. Этот тип месторождений связан с зонами выветривания магматогенных, метаморфических или карстующихся массивов либо с участками локализации в породах тех или иных биологически активных компонентов (U, Ra, As, Fe и др.), которые выщелачиваются грунтовыми водами. Месторождения рассматриваемого типа характеризуются малыми площадями развития кондиционных минеральных вод и ограниченными их эксплуатационными запасами, а также значительной неустойчивостью состава вод во времени.

В целом гидрогеологические условия этого типа месторождений особой специфики не имеют, и их разведка ведется как на обычные грунтовые потоки. Но при этом бывает необходимо проследить плановое положение участка с кондитионными минеральными водами и при возможности выявить ту часть коллектора, в которой происходит обогащение грунтовых вод тем или иным полезным компонентом. Например, при разведке радиоактивных минеральных вод таких месторождений чрезвычайно важно проследить в плане и разрезе местоположение эманирующего коллектора.

Особенности месторождений трещинно-жильного типа

Группа месторождений минеральных вод трещинно-жильного типа заслуживает более подробного рассмотрения. По своим морфологическим особенностям, разнообразию путей движения и локализации минеральных вод такие месторождения можно отнести к наиболее сложно построенным объектам. Эта обширная группа по существу объединяет все месторождения в трещинных гидрогеологических массивах, связанные с тектоническими дислокациями, гидротермально-метасоматическими образованиями, а также с выщерением высоко- и низкотемпературных интрузивов в осадочно-метаморфические толщи.

При изучении особенностей заложения и развития линейных дизъюнктивов можно отметить, что выявление той или иной трещинной системы даже в районе, где развитие минеральных вод установлено, не может еще служить однозначным показателем перспективности данного нарушения в отношении глубинных минеральных вод. Одиночное линейное нарушение в процессе длительного геологического развития территории далеко не всегда остается эффективным флюидопроводящим каналом вдоль всей своей протяженности.

Изучение главнейших рудных эндогенных полей, а также закономерностей территориального размещения большинства вулканических центров свидетельствует о том, что они локализуются в местах пересечений продольных структур в подвижных поясах с поперечными сдвиговыми структурами. Разведочные работы, проведенные на некоторых месторождениях минеральных вод, также показывают тесную связь очагов разгрузки глубинных потоков с зонами пересечения продольных и поперечных структур. Прослеживаемые на основе крупномасштабных региональных исследований очаги разгрузки минеральных вод вдоль одной протяженной системы нарушения также, как правило, совпадают с местами пересечения этой системы с поперечно ориентированными нарушениями. Последние (в большинстве сдвиговые) обеспечивают локальное растяжение и гидрогеологическую активизацию отдельных участков продольного нарушения. В этом отношении весьма показательны системы реги-

ональных разломов Приморья, Забайкалья, Тянь-Шаня, Кавказа и другие, вдоль которых отмечаются многочисленные проявления глубинных минеральных вод, приуроченных к структурным узлам, подобным описанным выше.

Другой вид трещиноватости в магматогенных и метаморфических массивах и осадочных толщах формируется за счет динамических усилий, развивающихся на стыке между вмещающей породой и выдавливаемыми снизу вверх поздними интрузивными образованиями. Эта трещинная сеть охватывает жесткий надсводовый блок и периферию интрузива. В связи с этим ослабленная зона с открытыми трещинами локализуется в массиве в виде своеобразного штока сильно разрушенных пород, в плане повторяющего контуры интрузива, но превосходящего его по размерам.

Можно рассматривать два предельных случая взаимодействия интрузива и жесткого метаморфического или магматогенного массива: 1) преобладающее температурно-метаморфическое воздействие высоконагретого интрузива на вмещающие породы; 2) преобладающее динамическое воздействие сравнительно низкотемпературного интрузива на вмещающие породы.

В пределах участков внедрения высокотемпературных интрузий эффект температурной и метасоматической переработки вмещающих пород преобладает над механическим воздействием внедряющегося магматического тела. При дальнейшем формировании интрузива как геологического тела происходит температурная усадка пород и их растрескивание. Однако максимум дизъюнктивных нарушений в этих случаях бывает приурочен к периферии интрузива и выражен полукольцевыми, кольцевыми и коническими дислокациями, вдоль которых после остыния интрузии опускался трещиноватый надсводовый блок пород. Именно эти процессы и обусловливают закономерности локализации месторождений минеральных вод этой группы.

Внешний контур месторождения охватывает наружные по отношению к интрузиву зоны и распространяется в глубь интрузивного массива. Среди таких по морфологии можно выделить два подтипа месторождений минеральных вод: в зонах развития кольцевых, конических и радиальных даек и в участках закалки вмещающей породы, сопровождаемых системами краевых разрывов (сбросов).

При внедрении низкотемпературных интрузий преобладает не процесс термической переработки вмещающих пород, а их механическое разрушение. В связи с этим создаются проникающие на большую глубину зоны трещиноватости, к которым приурочены восходящие потоки глубинных минеральных вод. Эти процессы также способствуют созданию специфических типов месторождений.

Месторождения минеральных вод, связанные с названными системами, отличаются сравнительно равномерным распределением

нием по площади (ограниченной в плане) гидрогеологически активных трещинных зон. Трещины в основном характеризуются хорошей проницаемостью. Форма и размеры тех или иных месторождений при прочих равных условиях зависят от следующих наиболее существенных показателей: а) состава и физико-механических свойств вмещающих пород; б) размеров и пространственной формы интрузивов; в) состава минеральных вод.

В отличие от месторождений подземных вод, приуроченных к пластовым системам, одним из важнейших показателей месторождений в жестких массивах является их форма, характеризуемая пространственными контурами распространения эффективной трещиноватости. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос о структуре глубоко залегающих месторождений минеральных вод горно-складчатых регионов и, прежде всего, в трещинном массиве — в данном случае под структурой понимается совокупность всех деформационных дислокаций (играющих роль резервных емкостей, водовыводящих каналов, экранов), влияющих на локализацию в массиве тех или иных запасов минеральных вод.

Важно выделить основные водовыводящие дислокации, которые являются наиболее проницаемыми коллекторами и, наряду с ними, — подчиненные трещинные системы, магазинирующие дополнительные (помимо естественных ресурсов), нередко упругие, статические запасы глубинных минеральных вод. Такого рода строение присуще глубоко залегающим месторождениям и в меньшей мере характерно для близповерхностных месторождений, формирующихся в пределах зон элювия. Для глубоко залегающих месторождений границы определяются главным образом структурными элементами (в меньшей мере температурными и химическими показателями), а для месторождений в элювиальных толщах границы устанавливаются только по гидродинамическим и гидрохимическим показателям.

Для глубоко погруженных месторождений необходимо различать два контура: внешний, совпадающий с границей распространения эффективной трещиноватости, где развиты минеральные воды; внутренний, ограничивающий наиболее проницаемые водовыводящие зоны. Таким образом, между двумя контурами этих месторождений аккумулируются дополнительные (к естественным ресурсам) запасы минеральной воды. Величина этих запасов зависит от емкости зоны трещиноватости, сопровождающей основное нарушение. Следует отметить, что в зависимости от конкретного набора структурных элементов на месторождении будут складываться те или иные условия разгрузки минеральных вод, а следовательно, формироваться различные виды их запасов (статические, естественные). Долевое соотношение различных видов ресурсов в формировании эксплуатационных запасов будет меняться в зависимости от площади, а главное, от глубины вскрытия изучаемого объекта.

Рассмотрим некоторые месторождения минеральных вод трещинно-жильного типа, локализующиеся в системах разрывных дислокаций различной морфологии.

Месторождения подземных минеральных вод, приуроченные к зонам нормальных сбросов, характеризуются значительными протяженностями гидрогеологически активных частей нарушения. Как правило, эти системы представлены круто падающими дизъюнктивами с мощностями нарушенных пород, достигающими десятков метров. Наиболее широкое развитие месторождения этого типа получили в пределах наложенных впадин, ограниченных системами крутых разрывных дислокаций. Месторождения нормальных сбросов формируются в условиях общего растяжения региона, в частности, в областях больших водовых поднятий, а нередко и в вызывающих вулканических областях. Говоря о морфологических особенностях этих месторождений, следует отметить, что для них понятие о внутреннем и внешнем контурах утрачивает смысл; так как емкостная часть здесь практически отсутствует. Эксплуатационные запасы таких месторождений формируются преимущественно за счет естественных ресурсов и могут достигать 2000—4000 м³/сут. Характерны в этом отношении Анкаванская (Малый Кавказ) и Улан-Баторская (Монголия) месторождения минеральных вод.

На месторождениях, связанных с трещиноватыми зонами малоамплитудных надвигов и взбросов, положение водовыделяющего канала контролируется непосредственно зонами нарушения. Обычно мощности зон нарушений сравнительно невелики и составляют первые десятки, реже сотни метров. Трещины здесь преимущественно открытые, хорошо проникаемые зоны приурочены к кромке нарушения вблизи от висячего крыла.

Рассматриваемые месторождения в основном распространены в горных долинах (тектонических депрессиях, прогибах), борта которых сложены магматогенными и метаморфическими толщами. В зависимости от рельефа местности выходы на дневную поверхность этих месторождений минеральных вод могут располагаться на различных отметках по отношению ко дну долины. Последнее обстоятельство обуславливает одну из особенностей разгрузки минеральных вод на этих месторождениях: в тех случаях, когда зона нарушения располагается на высоких отметках, в бортовой части долины, как правило, отмечается свободная разгрузка подземных минеральных вод в виде восходящих источников. В днищах долин надвиги и взбросы, перекрытые рыхлообломочными образованиями, содержащими грунтовые потоки, дают гидростатически экранированную разгрузку минеральных вод.

В общем случае для месторождений со свободной разгрузкой, в структуре которых не имеется каких-либо гидрогеологически неэффективных поперечных (к основному) нарушений, эксплуатационные запасы формируются за счет естественных

ресурсов. При наличии гидрогеологически неэффективных нарушений, секущих зону надвига или взброса и обуславливающих на пути движения восходящих минеральных вод повышенные гидравлические сопротивления, создаются условия для накопления упругих (иногда весьма значительных) запасов. С увеличением глубины залегания гидравлически слабо проницаемого узла доля упругих запасов в эксплуатационных возрастает. Для гидростатически экранированной разгрузки характерно формирование среди грутового потока специфического гидродинамического купола минеральных вод, объем и форма которого обуславливается естественными ресурсами. [11].

Трещинные емкости, сопутствующие основному нарушению, заключают статические запасы минеральных вод. Вследствие ограниченности объемов этих трещин и быстроты их затухания по мере удаления от основного нарушения, заключенные в них статические запасы минеральных вод невелики и практического значения не имеют. Рассматриваемые трещинные системы представляют собой резервную емкость упругих запасов минеральных вод лишь на больших глубинах при структурном экранировании основного канала разгрузки.

В пределах месторождений малоамплитудных взбросов и надвигов наиболее проницаемы зоны развития оперяющих нарушений, т. е. разрывных дислокаций высших порядков по отношению к взбросу (надвигу). Весьма перспективны на минеральные воды участки рассматриваемых нарушений, характеризуемые изгибами и ветвлением. Обычно на крыльях такого нарушения, приуроченных к выпуклой части дуги, отмечаются участки повышенной трещиноватости с восходящими минеральными водами.

Важными показателями месторождений являются положение в плане систем водовмещающих нарушений и ориентация их по отношению к генеральному направлению приповерхностных и поверхностных водных потоков, а также характер изменения напоров вдоль этих нарушений.

Для гидрогеологически эффективных нарушений возможно следующее распределение напоров вод: а) стабильное вдоль всей протяженности гидрогеологически активного нарушения; б) убывающее вдоль нарушения; в) меняющееся вдоль нарушения по определенному закону минимум—максимум—минимум (типа синусоиды). Характерным примером таких месторождений является Бжни в Армении.

Довольно широко развиты месторождения минеральных вод, приуроченные к зонам взбросов и надвигов с большими амплитудами перемещения. Истинный канал, выводящий с глубины восходящие потоки, может быть замаскирован системами чешуйчатых гравитационных сбросов. В некоторых случаях они хорошо прослеживаются по морфологическим признакам. Такие сбросы обычно сопровождаются тектоническими террасами,

спускающимися уступами к погруженным частям территории. Величины перепада высот между террасами при прочих равных условиях зависят от степени крутизны надвига (взброса), возрастаая с увеличением угла наклона плоскости сместителя.

Одним из важных показателей положения основного тектонического нарушения, замаскированного оползшими блоками пород, является выход плоскости сброса, занимающего в рельефе наивысшую отметку. Обычно этот гравитационный сброс контролирует на глубине взброс или надвиг. Вдоль участков, примыкающих к таким системам нарушений, и прежде всего вдоль основной дислокации (взбросов, надвига), развивается мощная зона брекчированных пород. Мощность зоны брекчирования возрастает с уменьшением угла наклона плоскости нарушения. При круто падающих системах нарушений зоны брекчий, несмотря на свою относительную маломощность, отличаются наиболее высокой проницаемостью.

Для всех месторождений, связанных со взбросами и особенно с надвигами, характерно постепенное уменьшение проницаемости по направлению от верхнего, висячего, крыла к лежачему. Внешний контур таких месторождений очень приближен к внутреннему, поэтому резервные емкости здесь отличаются малыми объемами.

Путями движения минеральных вод могут быть и вторичные дислокации, сопутствующие основному нарушению. Так, в основаниях надвигаемых блоков (вдоль поверхности горизонтального смещения) формируется брекчия трения, характеризующаяся наиболее низкими фильтрационными свойствами. Пониженные проводящие способности подошвенной части переместившихся блоков обусловлены также и тем, что ранее сформировавшийся элювий бывает обычно срезан и проводящей средой служит только брекчия пород подошвы переместившегося блока.

Разгрузка минеральных вод в пониженные части рельефа осуществляется по пологим или даже горизонтальным каналам, находящимися в основании блоков. Вследствие явлений подпора при разгрузке в рыхлую (аллювиально-элювальную) толщу часть глубинных вод поступает в гравитационные сбросы и выходит в виде минеральных источников на более высоких отметках.

Формирующаяся вдоль гравитационных сбросов маломощная зона брекчий отличается повышенными проницаемостями и может представлять самостоятельный интерес, т. е. зоны нормальных сбросов, сопровождающих взбросовые и надвиговые нарушения, иногда могут являться автономными эксплуатационными участками. Последнее обусловлено тем, что тыловые углы переместившихся блоков обычно характеризуются интенсивной трещиноватостью, тяготеющей к плоскости гравитационного сброса. Зона трещиноватости, будучи сравнительно малопротя-.

женной, самостоятельного интереса как объект возможной эксплуатации не представляет, однако служит аккумулятором минеральной воды, поступающей из основного нарушения. Эта зона интакт сбросовый канал, к плоскости которого обычно примыкает.

В целом разветвленные системы генетически различных нарушений в прибрежных частях тектонических депрессий (при территориальной близости выходов минеральных вод и единстве их гидродинамического режима) в близповерхностных условиях могут рассматриваться как единое месторождение трещинно-жильных вод с несколькими открытыми, гидростатически или структурно-эккавированными очагами разгрузки.

Для месторождений рассматриваемого типа характерны как статические (включая упругие), так и естественные ресурсы минеральных вод. Следует рассмотреть вопрос о разграничении месторождения на участки с существенно различными гидродинамическими режимами. Для предложенной схемы, исходя из учета ранее приведенных положений, можно говорить о наличии двух гидравлически самостоятельных частей одного месторождения, изолированных друг от друга подземным экраном (структурным). Если для первой части месторождения (с гидравлически эккавированной разгрузкой) имеют значение естественные ресурсы и статические запасы, то для второй (со структурно-эккавированной разгрузкой) преобладающую роль играют упругие запасы и естественные ресурсы.

Рассмотрим месторождения минеральных вод, связанные с линейно изолированными дайками, жилами и силлами различного петрографического состава.

В настоящее время известно большое число месторождений подземных минеральных вод, приуроченных к жильным образованиям и дайкам, образовавшимся на различных этапах геологического развития территории в полостях дислокационных нарушений, преимущественно сколового и разрывного характера. В процессе тектонической эволюции конкретного региона подвижки, происходящие вдоль ранее сформировавшихся ослабленных зон, подвергают вновь образовавшиеся жильные и дайковые тела растрескиванию, создавая глубокоуходящие проницаемые каналы. Формирование и последующее подновление трещин по старым тектоническим швам особенно сильно сказывается на фильтрационных свойствах гидротермальных жил, как правило, сложенных крупными минералами (сульфидами, карбонатами, кварцем и др.). Кварцевые жилы, как физико-химически инертные, сохраняют наиболее хорошие фильтрационные свойства в течение всего периода существования трещинной водонапорной системы.

Для месторождений минеральных вод, приуроченных к жильным образованиям, содержащим значительные количества минералов полевошпатовой группы, характерна кольматирован-

ность отдельных зон конечными продуктами разложения шпатов. Примером могут служить месторождения агрессивных минеральных вод, связанных с трещинными участками в пегматитовых дайках. Для гранитных пегматитовых тел характерно несколько взаимно сменяющихся зон, отличающихся друг от друга определенными минералогическими ассоциациями. Подобная минералогическая дифференцированность пород оказывается на механических и гидрогеологических свойствах всей дайки таким образом, что тектонические нагрузки приходятся на границы раздела различных зон, где создаются для восходящих напорных вод узкие проникаемые трещинные каналы. В случаях, когда к таким межзональным трещинным системам бывают приурочены высокогазонасыщенные минеральные воды, процессы активного углекислого выщелачивания раздробленных полевых шпатов приводят к разрушению систем с образованием калинита, заполняющего трещины. С точки зрения получения эксплуатационных притоков минеральной воды такие участки даек малоперспективны.

Как хорошие коллекторы минеральных вод, представляют интерес внутренние зоны даек, в которых развиты существенно кварцевые образования (зоны блокового кварца), а также внешние, примыкающие к сильно трещиноватому висячemu крылу на контакте пегматита с вмещающей породой. Наиболее перспективны участки, совпадающие с местами увеличений мощностей даек, так как в этом случае наблюдается непропорциональный рост сечений внутренней зоны, сложенной преимущественно кварцем.

На рассматриваемых месторождениях эксплуатационные запасы формируются из нескольких видов (естественных ресурсов, статических запасов) и могут составлять величины от десятков до нескольких сотен кубических метров в сутки. Месторождения минеральных вод данного подтипа представляют собой сложный, но довольно удобный для изучения объект, так как основной водовыводящий канал хорошо трассируется жильными и дайковыми образованиями. В частности, для пегматитов установлено, что их дайки имеют протяженность 50—3000 м, а мощность 5—150 м [74]. Морфологически — это обычно плитообразные тела, реже — внедрения с блоковыми формами. Типичными являются месторождения Терси и Шиванда.

В некоторых случаях формирующиеся на контакте интрузии с вмещающими породами разрывные нарушения (кольцевые, конические, радиальные) бывают заполнены магматогенным материалом (при последующих магматических фазах) или продуктами гидротермальных процессов. При этом жилы и дайки, испытавшие в позднейшие периоды динамические нагрузки, также становятся коллекторами и путями движения восходящих минеральных вод: в этом случае формируются месторождения, приуроченные к интрузивному телу и окаймляющие его.

Благодаря петрографическому отличию от вмещающих пород, а также высокой механической твердости, сохраняющей дайки от эрозии (при поверхностном залегании), рассматриваемые зоны локализации минеральных вод обычно хорошо просматриваются. Наличие таких месторождений нередко подчеркивается прослеживанием на местности самого интрузивного массива по комплексу показателей (изолированные положительные формы рельефа, обнажения коренных пород и др.).

Для рассматриваемых месторождений характерны крутые, приближающиеся к вертикальным, углы падения водовыводящих каналов и мощности, достигающие десятков метров. Они определяют основные пути разгрузки минеральных вод, т. е. внутреннюю зону. Такие месторождения также имеют внешний контур, замыкающий зону со слабой и быстро затухающей трещиноватостью.

Наиболее хорошо проводящие среды формируются на месторождениях, связанных с крутопадающими кольцевыми дайками: живые сечения трещины каналов на месторождениях с коническими, сравнительно пологопадающими дайками уменьшены за счет «запечатывающего» воздействия давящих сверху пород.

Возможны следующие распределения напоров вдоль даек: а) постоянные; б) переменные; в) точечные (гидрологически активные участки сменяются непроницаемыми). В соответствии с этим находятся величины разгрузки минеральных вод. В плане трещинные каналы месторождений кольцевых и конических даек подобны нагнетательным галереям, вдоль которых осуществляется вертикальная разгрузка глубинных минеральных вод.

В зависимости от места выхода основных каналов для данных месторождений следует рассматривать два типа разгрузки: свободный и гидростатически экранированный. Во втором случае месторождения, приуроченные к кольцевым и коническим дайкам, могут служить местными источниками питания грунтового водоносного горизонта и составлять значительную долю его расхода.

В геолого-историческом плане рассматриваемые месторождения могут многократно и существенно изменять свои гидрологические характеристики в зависимости от развития тектонической обстановки территории, материала, слагающего дайки, смены свойств разгружающихся глубинных минеральных вод и др. В отношении устойчивости коллекторских свойств во времени рассматриваемые месторождения аналогичны ранее приведенному типу месторождений линейных даек, жил и силлов.

Внедрение высокоразогретых магм в осадочные толщи обуславливает глубокое перерождение вмещающих пород, формирование по периферии интрузива четко прослеживаемой зоны закалки, облекающей в виде своеобразной коры интрузивное тело. В частности, наиболее сильно контактово-метасоматическое

перерождение регистрируется на контакте глинистых толщ с щелочными интрузивами. Причем в зоне переработки пелитовые породы приобретают кристаллическую, отличную от первоначальной, текстуру и высокую жесткость. Такое же контактово-реакционное явление с последующими заложениями разрывных дислокаций типа сбросов происходит при взаимодействии высокотемпературных интрузий кислого состава с известняками и доломитами (скарнирование) и гипербазитов с силикатными (песчанистыми) породами [29].

Породы в зонах термометасоматической переработки по своим физико-химическим свойствам существенно отличаются как от более жестких и инертных пород интрузива, так и от пластичных осадочных толщ, так как явления температурной усадки (после остывания магмы) обусловливают необратимые деформации именно в этой наиболее хрупкой части разреза, приводя к формированию систем краевых разрывных дислокаций. Как по разрезу, так и в плане эти дислокации имеют обычно извилистый характер. Кроме того, зона закалки, будучи наиболее близко расположенной к внешней кромке интрузии, оказывается местом наиболее интенсивного метасоматизма; именно здесь возможны явления кавернообразования за счет нескомпенсированного метасоматического выноса вещества во внешние области. Унаследованность тектонических подвижек обусловливает периодическое оживление ранее заложенной трециинной системы, сохранение ее фильтрационных свойств.

В природной обстановке «кора» закаленных и глубокометаморфизованных трещинных пород играет роль канала, питающегося вблизи от интрузивного тела прорванные водоносные горизонты. Этот канал по существу — местная зона питания водоносных горизонтов в осадочных толщах. В зависимости от гидрохимической обстановки в водоносных горизонтах и абсолютной отметки каждого из них поступающая из зон закалки минеральная вода, смешиваясь в разных пропорциях с пластовыми водами, на сравнительно небольшом удалении от места разгрузки будет формировать различные производные. Таким образом, в пределах рассматриваемых месторождений можно рассчитывать на выявление ценных вод различной минерализации и состава. Если интрузивный массив залегает на небольших глубинах и присводовая трециинная зона закалки обнажена или перекрыта рыхлыми образованиями небольшой мощности, на местности отмечается наиболее интенсивная разгрузка минеральных вод.

Мощность зоны метаморфизации зависит от характера вмещающих образований, состава и температуры магмы, но обычно она не превосходит трех — пяти сотен метров. Наибольшие мощности зоны закалки отмечаются в купольной части интрузива и в частях, примыкающих к пологому крылу магматогенного массива.

Зоны закалки на различных участках отличаются по фильтрационным характеристикам. Наибольшие величины водопроводимости обычно отмечаются на участках, примыкающих к пологим крыльям интрузива, для которых характерны сосредоточенные потоки восходящих минеральных вод. В зонах близи крутопадающих крыльев обычно наблюдаются большие величины падения напоров и ограниченные расходы минеральных вод. Участки пологопадающих крыльев интрузивов с примыкающими к ним зонами закалки представляют интерес как части разреза, к которым приурочены наибольшие величины естественных ресурсов минеральных вод. Типичным в этом отношении является месторождение Джермук.

Выдавливание холодных высоковязких интрузивных тел, характеризуемых большой лобовой поверхностью, приводит к сильному дроблению пород на больших площадях. При этом на участке давящего воздействия интрузии фиксируются неравномерные деформации, приводящие к блокированности вмещающих пород и обуславливающие обилие взаимно пересекающихся нарушений преимущественно разрывного характера. Плоскость каждой такой системы нарушений представляет собой обособленный канал разгрузки минеральных вод. Систематизированное изучение таких площадей показывает, что размещение гидрогеологически активных разрывных нарушений в их пределах неравномерно, хотя в центральных частях массива над сводами интрузий отмечается большая удельная плотность дизъюнктивов и лучшая их раскрытость.

Подобно рассмотренным выше случаям, здесь также возможны два типа разгрузки — свободный и гидростатически экранированный. Более распространены месторождения с гидростатически экранированной разгрузкой, так как на трещинной поверхности метаморфических и магматогенных образований формируется толща элювия, обычно заключающая грунтовые потоки¹. В таких случаях рассредоточенная разгрузка глубинных минеральных вод из-за процессов сложения течений приводит к некоторой деформации поверхности водного потока грунтового горизонта, обуславливая вблизи зон разгрузки отклонения движения грунтовых вод от общего направления.

При прочих равных условиях (близость абсолютных отметок поверхности, общность разреза и др.) абсолютные отметки поверхности грунтового водоносного горизонта на месторождениях рассматриваемого типа будут превышать отметки на смежных, лишенных минеральных вод, участках. Таким образом, вся территория месторождения может рассматриваться как местная

¹ Для рассматриваемых месторождений, являющихся в площадном отношении наиболее крупными, свободная разгрузка более типична лишь на отдельных участках, где те или иные процессы (например, глубокая эрозия) вскрыли один из водовыводящих каналов.

область питания грунтового водоносного горизонта, где модуль грунтового стока превосходит среднюю для района величину. На отдельных участках таких территорий в водоносном горизонте фиксируются пьезометрические купола.

Гидрогеологическая эволюция месторождений рассматриваемого типа в силу самокольматации идет по пути постепенного расширения площади разгрузки глубинных минеральных вод и последовательно охватывает трещинные породы от центральной, наиболее раскрытой надкупольной части массива, к его периферии, где за зонами краевых разрывов и сбросов трещиноватость затухает. Перемещение контуров такого месторождения от центра к периферии сопровождается соответственным ухудшением фильтрационных свойств массива, а постоянно идущие процессы кольматации трещин, усложняющие условия разгрузки глубинных минеральных вод, в некоторых случаях могут привести к практически полной самоизоляции месторождения.

Естественные ресурсы таких месторождений непосредственно связаны с размерами интрузива, увеличение которого вызывает формирование площадной трещиноватости, а также зависят от других более трудно учитываемых показателей (размещение областей питания глубинных минеральных вод, степень современной магматической и тектонической активности территории и др.). Эксплуатационные запасы минеральных вод, оцениваемые по отдельным участкам таких месторождений, могут достигать (в прикупольной трещинной части) 15–30 л/с. Типичным примером является месторождение Малка (Камчатская область).

Нередко среди литифицированных осадочных пород или в жестких магматогенно-метаморфических массивах вокруг малоразмерных в плане интрузивных тел (тел прорыва) формируются достаточно крупные по размерам месторождения минеральных вод, где отдельные выходы глубинных потоков обычно локализуются вдоль кольцевых или радиальных нарушений типа нормальных сбросов. В таких случаях каждая из линейных зон нарушений, выводящих к поверхности глубинные минеральные воды, несмотря на возможную удаленность от аналогичных ей гидрогеологически активных структур территории, представляет собой лишь участок единого площадного месторождения. Весьма часто встречаются системы кольцевых и полукольцевых дислокаций, служащих связующими каналами. Это обстоятельство принципиально отличает такие месторождения минеральных вод от ранее рассмотренных месторождений в пределах гидравлически изолированных нормальных сбросов. В случае гидростатически экранированной разгрузки минеральных вод их доля в расходе грунтового водоносного горизонта на отдельных участках может достигать 30–40%.

Естественные ресурсы минеральных вод на участках гидрогеологически активного нарушения протяженностью 0,5–

0,8 км могут достигать 0,3—0,8 тыс. м³/сут, в осадочных толщах — могут быть значительно выше. При этом оцениваемые эксплуатационные запасы (отбор минеральной воды одиночными скважинами) в среднем составляют в магматогенных комплексах 250—350 м³/сут, в осадочных толщах до 2—2,5 тыс. м³/сут.

Разгрузка минеральных вод в грунтовый водоносный горизонт приводит к деформации водной поверхности в этом горизонте и на карте гидроизогипс выражается полосой повышенных по сравнению с окружающими отметками уровней. Эта полоса совпадает с направлением гидрогеологически активного разрывного нарушения. Примером месторождений минеральных вод являются Железноводское, Пятигорское, Шмаковское.

II. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Основы методики полевых геофизических исследований

Стадии и задачи геофизических исследований. Изучение минеральных подземных вод с различной степенью детальности и достоверности может осуществляться по материалам всех стадий геофизических исследований: мелко-, средне- и крупномасштабных. Большая часть территории СССР охвачена сетью мелкомасштабных (региональных) геофизических наблюдений (1 : 500 000 — 1 : 1 000 000), которые ориентированы на общее изучение геологического строения и прогнозирование важнейших видов полезных ископаемых. До последнего времени эти исследования использовались при изучении минеральных вод чрезвычайно редко. Однако в связи с развитием нового направления — региональной гидрогеологической геофизики [46] создаются реальные предпосылки для их привлечения с целью прогнозирования месторождений минеральных вод.

Материалы геофизических наблюдений при государственных среднемасштабных гидрогеологических съемках являются основой для дальнейших гидрогеологических поисково-разведочных работ любого направления, в том числе и тех, которые связаны с минеральными водами. Однако редкая сеть наблюдений и ограниченность применения некоторых высокоеффективных (но дорогостоящих и сложных) методов позволяют вести поиски по этим материалам лишь наиболее простых типов месторождений минеральных вод.

Таким образом, поиски и разведка месторождений минеральных вод требуют в большинстве случаев постановки специальных детальных геофизических исследований. Особенно велика

роль геофизических работ на поисковом этапе, когда они совместно с гидрогеологическими и другими методами направлены на выявление новых месторождений (перспективных участков, площадей) минеральных вод. При последующих исследованиях наземные геофизические методы используются обычно лишь при предварительной разведке. Основной ее целью является получение данных о структуре месторождения, его контурах, гидрогеологических условиях, степени связи или разобщенности различных горизонтов и обводненных зон, а также других особенностей месторождения [12]. При детальной и эксплуатационной разведках, как правило, проводится только каротаж скважин.

Перечисленные задачи могут быть дифференцированы на серию более мелких, частных задач, которые по своему направлению можно объединить в пять групп (табл. 1). Из табл. 1 видно, что геофизические методы позволяют не только изучать геометрию геологической среды, но и определять ее водно-физические, физико-химические и другие параметры.

Геофизические методы, применяемые при поисках и разведке минеральных вод. При проведении полевых работ необходимо знать разведочные возможности геофизических методов, уметь выбирать их рациональный комплекс в зависимости от природных условий, конкретных задач и степени изученности объекта; намечать размеры геофизических установок; определять контуры исследуемых площадей; устанавливать сеть наблюдений и т. п. Все это определяет методику полевых геофизических работ и ее специфику.

Известно, что геофизические методы, используемые в геологической разведке, можно подразделить на полевые (воздушные, наземные, морские, шахтные, околоскважинные) и скважинные. При поисках и разведке подземных минеральных вод наибольшее распространение получили из полевых наземные и околоскважинные, а также скважинные методы (последние рассматриваются в следующем разделе).

Геофизические методы, применяемые при поисково-разведочных работах на различные полезные ископаемые, в определенной мере могут использоваться и для исследования месторождений минеральных вод. Однако при решении тех или иных гидрогеологических задач, а также вследствие разнообразия природных условий резко меняются их эффективность и стоимость. Кроме того, не все геофизические методы достаточно полно апробированы для решения этих задач.

В связи с этим существующие геофизические методы по возможности их использования при поисках и разведке минеральных вод следует подразделить на две группы. Первая группа объединяет геофизические методы, которые рекомендуется применять при полевых работах.

Методы первой группы можно подразделить на методы наиболее часто используемые и применяемые эпизодически, для ре-

Таблица 1

Основные направления исследований	Частные задачи, разрешаемые полевыми геофизическими методами
Общие геологические и гидрогеологические	<p>Расчленение осадочного покрова на основные литолого-стратиграфические комплексы пород с выделением водоносных и водоупорных горизонтов (комплексов); определение распространения, мощности, глубины залегания и изменения литологического состава выделенных комплексов (горизонтов) в пределах изучаемой площади. Выявление и прослеживание локальных складчатых структур и зон разломов.</p> <p>Геологическое картирование массивных пород под покровом рыхлых осадочных отложений. Изучение трещиноватости и закарстованности массивных пород</p>
Гидродинамические	<p>Выявление места питания и разгрузки подземных вод, гидравлической связи напорных и грунтовых вод, а также связи подземных вод с поверхностью; определение направления и скорости фильтрации подземного потока.</p> <p>Установление уровня грунтовых, а также уровня и пьезометрической поверхности напорных вод.</p> <p>Оценка фильтрационных свойств водоносных и слабопроницаемых пород</p>
Гидрогеохимические	<p>Оконтуривание участков с пресной и соленой водой. Оценка степени общей минерализации подземных вод на всем диапазоне глубин и по всей площади их распространения</p>
Геотермические	<p>Оконтуривание участков разгрузки термальных вод. Глубинное геотермическое прогнозирование</p>
Геокриологические	<p>Выявление глубоких и сквозных таликов. Определение мощности многолетнемерзлых пород</p>

шения отдельных задач. Это деление — условное, отражающее современное состояние методов.

С другой стороны, среди методов первой группы можно выделить такие (как правило, отличающиеся небольшой глубиной исследования), которые при определенной обстановке позволяют непосредственно фиксировать некоторые гидрогеологические характеристики: минерализацию, температуру, радиоактивность подземных вод, а также скорость и направление подземного потока, уровень грунтовых вод и т. п. Остальные методы этой группы ориентированы на изучение структуры месторож-

дения и косвенную оценку некоторых гидрогеологических параметров.

Электроразведка. При гидрогеологических исследованиях методы электроразведки используются в наибольшей мере. При поисках и разведке минеральных вод применяются: метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), электропрофилирование (ЭП), метод естественных электрических полей (ЕП), метод круговых вертикальных электрических зондирований (КВЭЗ), резистивиметрия в неглубоких горных выработках и водоемах, метод заряженного тела в скважинах (МЗТ), метод вызванных потенциалов (ВП) и некоторые другие. Наиболее часто используют методы ВЭЗ, ЭП и ЕП, остальные — сравнительно редко.

Метод ВЭЗ практически универсален, так как при решении большинства гидрогеологических задач его можно применять во всех природных условиях. Связано это с тем, что метод позволяет расчленить геологический разрез по вертикали (практически до 500—600 м); по его данным можно определить удельное электрическое сопротивление, которое достаточно четко связано с литологическим составом, увлажненностью, температурой, степенью уплотнения пород и минерализацией подземных вод. Таким образом, метод ВЭЗ в некоторых случаях может служить для прямого обнаружения минерализованных или высокотермальных вод.

Электропрофилирование является упрощенным вариантом метода ВЭЗ, особенно если выполняется при 2—3 различных разносах питающей линии *AB*. Этот метод позволяет изучать геологические и гидрогеологические характеристики разреза на определенной сравнительно небольшой глубине (как правило, до 100 м) вдоль профиля с более четким, чем по ВЭЗ, выделением вертикальных границ. При поисковых работах обычно применяют наиболее простые схемы ЭП, например двухгоризонтное симметричное профилирование (СЭП). При разведке схемы могут усложняться; в этом случае используют комбинированное трехэлектродное (КЭП), градиентное, линейное профилирование и др.

С помощью метода ЕП наиболее часто регистрируют фильтрационные и диффузионные потенциалы, возникающие при прохождении подземных вод сквозь пористые среды. Этот малоглубинный метод позволяет локализовать участки, где напорные воды разгружаются в грунтовые. Возможны и некоторые другие области его применения. Например, окисление рассеянного никрита в породе способствует возникновению естественных потенциалов; в связи с этим создается предпосылка использования метода для оконтуривания образующихся месторождений железистых вод. Рассматриваемый метод имеет некоторые ограничения. Значительная мощность экранирующих рыхлых отложений (более 10—15 м), сложный расчлененный рельеф, нали-

чие индустриальных помех, высыхание почвенного покрова — все это обычно исключает возможность применения метода ЕП. Для выявления ложных аномалий в полевой сезон наблюдения ЕП рекомендуется повторять. Иногда это позволяет уловить изменения в режиме подземных вод. Исследования с помощью метода ЕП необходимо выполнять по весьма густой сети наблюдений (расстояние между пунктами не превышает 10—20 м).

Метод резистивиметрии применяется не только при каротаже глубоких скважин, но и в открытых водоемах, горных выработках, мелких скважинах и позволяет получать представление об электрическом сопротивлении преимущественно грунтовых вод. Электрическое сопротивление воды имеет четкую связь со степенью ее минерализации, поэтому с помощью резистивиметрии можно быстро оценить последнюю. Резистивиметрия может служить для прямого изучения подземных минеральных вод. Для исследования режима подземных вод целесообразно проводить повторные замеры их электрического сопротивления. Часто одновременно с резистивиметрией производятся температурные и радиометрические измерения.

Метод КВЭЗ применяется в тех случаях, когда наблюдается горизонтальная анизотропность разреза. Особенность она заметна при изучении карбонатных отложений, интенсивно нарушенных кавернозностью и вертикальной трещиноватостью. Метод КВЭЗ позволяет выделить в плане зоны с наиболее развитой трещиноватостью (кавернозностью) пород [55]. Метод КВЭЗ от ВЭЗ отличается низкой производительностью, поэтому его следует использовать в ограниченных объемах. Глубинность метода КВЭЗ всецело зависит от мощности и электрической проводимости рыхлых песчано-глинистых отложений, перекрывающих изучаемые трещиноватые породы. При высоком электрическом сопротивлении экранирующих образований глубинность метода КВЭЗ может достигать 100—200 м. Если же сопротивления их низкие, а мощность достигает нескольких десятков метров, то метод КВЭЗ становится неэффективным.

Дипольное зондирование (ДЗ) применяется при значительной глубине структурных исследований — более 500—800 м и в условиях артезианских бассейнов. Достоинством метода является возможность не только расчленять разрез на отдельные горизонты, но и выявлять их наклон, прослеживать крупные разломы.

Метод ВП позволяет расчленять слабодифференцированный разрез, сложенный терригенными породами. С его помощью можно также прослеживать зоны разломов, особенно когда последние обогащены сульфидными минералами. Глубинность метода невелика — до 100 м (обычно первые десятки метров); производительность намного ниже метода ВЭЗ, стоимость значительная. Метод ВП в настоящее время широко применяется при крупномасштабных мелиоративных съемках [50]. Однако

теоретические основы и методика интерпретации его результатов еще разработаны недостаточно, поэтому этот метод следует использовать для изучения месторождения минеральных вод, как правило, в ограниченных объемах.

Метод заряженного тела (МЗТ) применяется для определения направления и скорости подземного потока по одной скважине. Методика таких исследований рассмотрена в работах Б. К. Матвеева [44]. Эти исследования можно выполнять при соблюдении некоторых условий: 1) глубина подземного потока не должна превышать 100—150 м; 2) коэффициент фильтрации водовмещающих пород должен быть не менее 1,0—1,5 м/сут; 3) в разрезе над изучаемым водоносным горизонтом (комплексом) должны отсутствовать высокоомные электрические экраны; 4) изучаться могут подземные воды только невысокой минерализации.

Сейсморазведка. В гидрогеологии сейсморазведка в зависимости от источников возбуждения упругих колебаний среды используется в двух вариантах: сейсморазведка с возбуждением за счет падающего груза и сейсморазведка в обычном варианте с взрывами в скважинах, шурфах или в воздухе.

Первый вид сейсморазведки отличается малой глубинностью (10—20 м) и применяется для определения уровня грунтовых вод, расчленения на отдельные горизонты приповерхностной части разреза (особенно выше уровня грунтовых вод), выявления зон трещиноватости и решения некоторых задач инженерной геологии. Этот вид работ, основанный на использовании преломленных волн (МПВ), называют малоглубинной, или инженерной, сейсморазведкой. Отличительной особенностью инженерной сейсморазведки является применение продольных и поперечных волн, различных частот колебаний, широкого анализа динамических характеристик упругих волн [19, 20].

Сейсморазведка с взрывными источниками колебаний привлекается для структурных исследований и используется в гидрогеологии в двух модификациях — КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) и МОВ (метод отраженных волн). Наибольшее применение при поисках и разведке минеральных вод получили инженерная сейсморазведка и корреляционный метод преломленных волн.

Метод КМПВ позволяет в однородном разрезе четко выделять горизонты различной мощности. По сравнению с методом ВЭЗ метод КМПВ намного точнее определяет глубины маркирующих горизонтов и более дробно дифференцирует разрез. С высокой точностью и надежностью по КМПВ на значительной глубине можно выделить разломы малой амплитуды, а в ряде случаев обнаружить под рыхлым покровом зоны разломов (или дробления пород), которые не фиксируются разрывом сплошности исследуемой поверхности. Особенно хорошо с помощью КМПВ выделяются зоны разломов, претерпевшие интенсивную

гидротермальную переработку [31]. Кроме того, по КМПВ под рыхлым покровом среди разнообразных скальных пород можно выделить известняки, доломиты, гранитоиды, характеризующиеся резко отличающимися значениями граничных скоростей. К недостаткам КМПВ относится высокая стоимость работ.

Сейсморазведка МОВ при поисках и разведке минеральных вод используется весьма редко. С помощью МОВ можно лишь прослеживать отдельные границы на глубине более 200—400 м. Достоинством метода является возможность изучения на значительной глубине маломощных горизонтов, например гипсов среди карбонатных пород. Однако при этом практически исключается характеристика физических параметров изучаемых горизонтов.

Магниторазведка. При поисках и разведке минеральных вод используются две модификации магниторазведки в наземном варианте: обычная наземная съемка вертикальной составляющей магнитного поля и микромагнитная съемка. Второй метод в отличие от первого применяется довольно редко; хотя разведочные возможности его при изучении слабых магнитных полей безусловно высоки [80], широкому внедрению его в практику мешает отсутствие портативной высокоточной аппаратуры.

Магниторазведка позволяет картировать метаморфические и изверженные породы, расчленяя их по степени магнитоактивности. Кроме того, с помощью метода возможно трассирование зон разломов. Установлено, что в зонах длительной гидротермальной или тектонической переработки пород магнитная восприимчивость последних, как правило, резко снижается в связи с разрушением магнитных минералов (преобразованием их в немагнитные). Это является важным показателем при поисково-разведочных работах на минеральные воды.

Магниторазведка в значительной мере восполняет данные электропрофилирования при изучении скальных пород. В условиях развития мощной толщи осадочных пород применение магниторазведки в гидрогеологических целях становится менее эффективным.

Гравиразведка. При поисках и разведке минеральных вод используются, как правило, площадные высокоточные гравиметрические наблюдения. Гравиразведка применяется довольно редко, поскольку требуются дорогостоящие топографические работы. Материалы гравиметрических съемок позволяют решить примерно такой же круг вопросов, что и данные магнитных съемок; совместное использование гравитационных и магнитных наблюдений дает более однозначное решение геологических задач. Если породы не являются магнитоактивными, но достаточно четко различаются по плотности, только по гравиметрическим наблюдениям можно прослеживать контакты пород, выявлять крупные подземные полости, оконтуривать магматичес-

кие тела, скрытые на глубине (например, гранитные интрузивы, с которыми могут быть связаны радионовые воды) и т. п. [47]. По гравиметрическим данным можно изучать тектонику артезианских бассейнов, особенно тех, которые приурочены к межгорным и предгорным впадинам, с выявлением локальных структур, зон разломов и других нарушений; иногда использование гравиразведки в комплексе с ВЭЗ позволяет отказаться от дорогостоящей сейсморазведки.

Термометрия¹. Метод используется как при каротаже скважин (см. ниже), так и при полевых исследованиях в виде: а) наземных наблюдений, заключающихся в точечных замерах температуры (с помощью термометров или термисторов) в шурфах, шпурах, неглубоких скважинах, колодцах, мелких водоемах; б) инфракрасной аэрофотосъемки [13, 84].

При изучении трещинно-жилых термальных вод горно-складчатых областей наземные термометрические наблюдения ведутся на глубине 1—2 м. Столь малая глубина исследований связана с заметными температурными аномалиями, образуемыми восходящими потоками термальных вод. Значительно слабее аномалии, создаваемые в зонах разгрузок термальных вод артезианских бассейнов. Здесь замеры температуры проводятся на глубине до 30—50 м, т. е. на уровне горизонта постоянных годовых температур, и, как правило, ниже интенсивного грунтового потока.

Инфракрасная аэросъемка является новым методом аэрогеофизических исследований; она позволяет решать гидрогеологические задачи; в числе их — оконтуривание участков, в пределах которых на незначительной глубине идет разгрузка термальных подземных вод. Наиболее благоприятными для применения инфракрасной аэросъемки являются зоны с резкими температурными контрастами — области современного вулканизма, площади распространения многолетнемерзлых пород и т. п. Метод может быть использован на поисковом этапе. По-видимому, по мере выпуска серийной аппаратуры с повышенной разрешающей способностью инфракрасная аэросъемка сможет получить широкое распространение в различных природных условиях страны.

Радиометрия. Метод используется главным образом в виде эманационной съемки, основанной на определении содержания радона в почвенном воздухе. Метод позволяет выявить участки с повышенной радиоактивностью горных пород и обнаружить месторождения радионовых вод. С его помощью можно

¹ Новым способом геотермических исследований является метод вариации теплового потока [76]. Метод основан на регистрации в неглубоких скважинах теплового потока. С гидрогеологическими целями метод еще не опробован. Можно рассчитывать на его высокую эффективность при поисках термальных вод.

также трассировать под рыхлыми отложениями зоны разломов и контакты различных пород, особенно четко выявляются контуры гранитоидов. Метод отличается небольшой глубинностью.

При мощности глинистых отложений, перекрывающих коренные породы, более 10 м эффективность его резко падает [53].

Ко второй группе относятся методы, которые специально ставить в поле нецелесообразно. Однако результаты этих методов, ранее полученные при съемках нефтепоискового, рудного и других направлений, после соответствующей интерпретации могут использоваться при проводимых исследованиях.

Из методов зондирования земной коры, применяемых при изучении артезианских бассейнов, могут быть использованы метод теллурических токов (ТТ), магнитотеллурическое зондирование и профилирование (МТП и МТЗ), зондирование становления электрического и магнитного полей (ЗСЕ и ЗСМ) и некоторые другие. Достоинством всех этих методов является возможность по их данным оценить величину продольной электрической проводимости S рыхлых пород, перекрывающих фундамент [46]. Дополнительная ценная информация может быть получена по данным МТП, МТЗ и ЗСМ, основанных на изучении магнитной составляющей электромагнитного поля и позволяющих изучать геоэлектрический разрез под высокомощными экранами (например, под мощной толщей многолетнемерзлых пород, под карбонатными породами и т. п.). В условиях горно-складчатых сооружений и щитов из электрометрических методов, примененных при поисках и разведке рудных месторождений, особый интерес для гидрогеологии представляют результаты методов заряженного тела и вызванных потенциалов, позволяющих в определенных условиях выявлять интенсивно обводненные зоны дробления.

Из методов сейсморазведки косвенное использование в гидрогеологии могут дать результаты глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) и сейсмологических наблюдений. Метод ГСЗ позволяет оценить мощность земной коры и выявить подкоровые неоднородности. Этот метод способствует мелкомасштабному тектоническому районированию крупных регионов. Сейсмологические наблюдения, основанные на регистрации землетрясений, позволяют разрешить примерно те же задачи, что и ГСЗ, правда, с меньшей точностью и детальностью; кроме того, по их данным можно выявить и проследить тектонически активные зоны разломов.

Из магниторазведочных методов упомянем аэромагнитную съемку. Большая часть территории СССР в настоящее время изучена ею. Эти материалы могут быть использованы для геологического картирования скальных пород, поскольку позволяют судить о глубине залегания, тектонике и литолого-петрографическом составе магнитоактивных пород.

Эффективность методов второй группы при изучении месторождений минеральных вод невелика. Глубинность их обычно не совпадает с оптимально-целесообразными глубинами исследований при гидрогеологических наблюдениях; они, как правило, не позволяют изучить физические свойства пород разреза; по этим данным не удается детально расчленить разрез на основные водовмещающие и водоупорные комплексы; стоимость таких исследований во многих случаях велика. Тем не менее целесообразно привлекать имеющиеся результаты перечисленных методов при региональном прогнозировании наличия минеральных вод.

Принципы комплексирования геофизических методов. В основе комплексирования геофизических и других методов, используемых в геологической разведке, лежит требование получить наиболее полную геологическую информацию с минимальными затратами средств в кратчайшие сроки. В связи с этим необходимо, во-первых, комплексировать всю совокупность геофизических методов с другими методами, используемыми при поисках и разведке минеральных вод; во-вторых, комплексировать полевые геофизические методы со скважинами (каротажными); в-третьих, комплексировать (сочетать) отдельные полевые геофизические методы и модификации при решении тех или иных геологических задач.

Каждый вид работ (в том числе и геофизических) является неразрывной частью общего исследования, когда результаты одних методов способствуют эффективному использованию других. Особенno важно сочетание геофизических методов с ландшафтными и гидрогеохимическими, так как те и другие не требуют больших затрат, но способствуют при совместном использовании получению на большой площади непрерывной гидрогеологической характеристики разреза при резком сокращении дорогостоящих буровых работ, сопутствующих им опытных откачек и т. п. Это, конечно, не исключает бурение небольшого числа опорных скважин (или проходки горных выработок), закладываемых до осуществления геофизических съемок или параллельно с ними. При поисках и разведке минеральных вод целесообразно также предусматривать некоторый объем горно-буровых работ для контроля результатов геофизических исследований.

На всех этапах исследования необходимо сочетать полевые и скважинные методы геофизических наблюдений. Скважинные исследования в первую очередь служат для привязки наблюдений к конкретной геологической обстановке. С другой стороны, не все задачи с требуемой точностью можно решить только наземными геофизическими методами. Поэтому в определенных условиях главенствующими становятся скважинные геофизические исследования. На стадии детальной разведки каротаж обычно является единственным методом геофизических исследований.

Комплексирование полевых геофизических методов можно производить по нескольким схемам: а) решение одной задачи несколькими геофизическими методами; б) независимое решение каждой из задач отдельным геофизическим методом; в) построение решения одной задачи на базе решения другой. Возможно и разнообразное сочетание названных схем. Первый путь используется обычно при решении особо важных и сложных задач на ограниченных площадях. При решении некоторых задач более удобен второй путь. Например, можно определить уровень грунтовых вод с помощью сейсморазведки, а контуры и мощность водопосыпных пород — по данным электроразведки. Наиболее эффективным, однако, является третий путь, так как в максимальной мере используется информация каждого метода.

Площадь, система и сеть наблюдений. Площадь геофизической съемки резко меняется в зависимости от размеров изучаемого месторождения, однородности геолого-гидрологических условий, состояния изученности района исследований, стадии геологоразведочных работ и других факторов. Наибольшие площади исследований приурочены к артезианским бассейнам платформенного типа (сотни и тысячи квадратных километров), наименьшие — к горно-складчатым сооружениям (десятки, единицы и даже доли квадратных километров). Размеры площади поисково-разведочного участка геофизик определяет совместно с гидрологом. При установлении его контуров помимо указанных соображений принимаются во внимание также геологические и гидрологические критерии, помогающие выявить и уточнить строение месторождения [12]. Следует также учитывать постановку параметрических замеров, т. е. привязку геофизических наблюдений к выходам на поверхность основных маркирующих горизонтов, имеющимся скважинам, источникам минеральных вод и т. п. Если последние находятся за контуром основной площади, к ним прокладываются специальные привязочные профили.

Системы наблюдений. При геофизических работах они могут быть следующие: а) отдельные профили (маршруты) и разрозненные точечные наблюдения; б) сплошная площадная съемка по установленной сети (сетке) наблюдений; в) смешанная система, сочетающая в себе профильные, точечные и площадные наблюдения. При изучении месторождений минеральных вод наиболее применимы вторая и особенно третья системы наблюдений; первая система изредка используется на стадии поисков.

В течение полевого периода можно выделить три основных этапа геофизических работ. На первом (начальном) этапе отрабатываются несколько геофизических профилей (маршрутов), рассекающих поперек, а иногда и вдоль участок; параллельно выполняется серия параметрических замеров. Эти работы спо-

собствуют районированию территории по геофизическим условиям, позволяют уточнить план дальнейших исследований и дают основу для более однозначного истолкования геофизических аномалий. На втором (основном) этапе выполняется по уточненной сети подавляющий объем наблюдений. На третьем (заключительном) этапе производятся дополнительные исследования, направленные на детализацию выявленных аномалий и уточнение строения отдельных площадей. В целях экономии средств необходимо умело сочетать дорогостоящие исследования (КМПВ, ВЭЗ с большими разносами и др.) со сравнительно недорогими (ЭП, магниторазведка и др.). Первые обычно в небольших объемах используются на начальном и большие — на заключительном этапах. На основном этапе выполняются главным образом сравнительно недорогие исследования.

Сеть геофизических наблюдений должна обеспечить с требуемой точностью при минимальных затратах решение поставленных гидрогеологических задач. Густота и конфигурация ее определяются: а) требованиями к точности и детальности геологических результатов; б) степенью однородности геологических, гидрогеологических и геофизических условий и размерами изучаемых объектов; в) проходимостью местности; г) точностью полевых геофизических наблюдений; д) совершенством методики интерпретации. При поисках и разведке минеральных вод решается одновременно несколько задач, однако исследователи стремятся избрать одну, в крайнем случае две системы наблюдений, идя на определенный компромисс либо ориентируясь на решение только наиболее важных задач.

В настоящее время вопрос о выборе рациональной сети геофизических наблюдений при гидрогеологических исследованиях достаточно глубоко не разработан. Исследователи обычно используют эмпирический подход. В результате практического опыта наметились определенные тенденции в выборе результирующих масштабов, а следовательно, и сети наблюдений. Так, при поисках минеральных вод в условиях артезианских бассейнов используется обычно масштаб 1 : 100 000 — 1 : 200 000, при предварительной разведке — 1 : 25 000 — 1 : 50 000, в условиях трещинных массивов — соответственно 1 : 25 000 — 1 : 50 000 и 1 : 1000 — 1 : 10 000.

Имеются примеры, когда сеть наблюдений и масштабы карт определяются аналитическим способом: при прослеживании контактов под покровом рыхлых отложений можно привлекать автокорреляционные функции [35], при изучении же монотонно меняющихся показателей (глубины залегания горизонта, изменения минерализации подземных вод и т. п.) целесообразно использовать специальные функции, рассмотренные Н. Н. Пузыревым [69] и др.

Классификация месторождений минеральных вод с целью их разведки. В настоящее время используется несколь-

ко классификаций месторождений минеральных вод. В одних учитывается главным образом химический состав, наличие в воде бальнеологически ценных компонентов [34, 51]; в других — за основу берется генезис минеральных вод и насыщающих их газов [53]. Имеется несколько классификаций, предложенных для отдельных типов месторождений минеральных вод (углекислых, радоновых, термальных, сульфидных и др.). В этих классификациях, разработанных Н. М. Елмановой (1974 г.), А. П. Караваевой (1973 г.) и другими [4, 6, 77], учитываются структурные, генетические, бальнеологические и другие особенности месторождений.

В последние годы Г. С. Вартаняном [12] предложена классификация с целью разведки минеральных вод, основанная на анализе структуры и гидродинамики месторождений. Из существующих эта классификация наиболее удобна при геофизической разведке. С некоторыми изменениями, учитывающими опыт других классификаций, используемых геофизиками, она принимается в настоящей работе за основу типизации месторождений. В предлагаемой системе (табл. 2) все типы месторождений объединены в три группы, привязанные к наиболее крупным геоструктурным и соответственно гидрогеологическим элементам —

Таблица 2

Группы месторождений минеральных вод	Типы месторождений
Платформенных артезианских бассейнов	Грунтовых минеральных вод Приуроченных к зонам разгрузки напорных вод в бассейны грунтовых вод Связанных с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие напорные горизонты Пластовые
Предгорных, межгорных артезианских бассейнов и склонов	Грунтовых минеральных вод Приуроченных к зонам разгрузки напорных вод в бассейны грунтовых вод Связанных с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие напорные горизонты Пластовые
Гречинных массивов, щитов и горно-складчатых сооружений	Грунтовых минеральных вод Трещинно-жильных водонапорных систем Связанные с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие грунтовые и напорные горизонты В областях флишевых отложений

артезианским бассейнам, горно-складчатым сооружениям, щитам и т. п. В последующих разделах при рассмотрении отдельных типов месторождений обращено внимание на геофизические особенности каждого из них. В некоторых случаях в связи с разнообразным характером наблюдаемых геофизических полей и соответствующим образом меняющейся методикой геофизических исследований дополнительно выделены подтипы (или разновидности) месторождений.

Комплексирование полевых геофизических методов и некоторые приемы интерпретации

Гидрогеологическая интерпретация производится несколькими способами. Первый из них заключается в структурных построениях для косвенного решения гидрогеологических задач. Второй основан на специальных параметрических наблюдениях, что позволяет на базе структурных исследований и выявленных корреляционных зависимостей находить прямые гидрогеологические решения. Третий способ сводится к применению геофизических наблюдений, непосредственно фиксирующих наличие минеральных вод¹.

Решение общих гидрогеологических и геологических задач. Наиболее часто приходится решать следующие вопросы.

Определение мощности рыхлых отложений, залегающих на массивных породах. Рыхлые отложения обычно представлены терригенными образованиями. Массивные породы могут быть сложены карбонатно-хемогенными толщами, метаморфизованными и дислоцированными породами складчатого основания, кристаллическими образованиями фундамента. Задача разрешается методами ВЭЗ, ЭП и сейсморазведки, значительно реже — грави- и магниторазведки. Наиболее часто используется метод ВЭЗ [50, 56].

Выявление и прослеживание древних долин, врезанных в коренные породы. При изучении погребенных долин широко применяется электроразведка (ВЭЗ, ЭП). Однако при этом иногда возникают трудности, связанные со слабой дифференцированностью геоэлектрического разреза. Для большей однозначности в такой ситуации целесообразно привлекать высокоточную гравиразведку. В сложных условиях, когда ни электро-, ни гравиразведка не решают задачу, может быть использована сейсморазведка КМПВ. Особенно хорошо с помощью сейсморазведки прослеживаются древние долины, врезанные в карбонатные породы. Заполнение этих долин высокомным песчаным материалом, геоэлектрически не отличающимся от карбонатных пород, не является помехой для КМПВ.

¹ В случаях, когда решения задач достаточно просты и проводятся по стандартной методике, приемы интерпретации специально в данном разделе не рассматриваются.

Расчленение терригенных пород рыхлого покрова на отдельные литологические горизонты. При сравнительно малых глубинах (примерно до 100 м) для решения этой задачи используются ВЭЗ, ЭП, а при слабой дифференцированности разреза — ВЭЗ-ВП [50].

При расчленении разреза терригенных пород на значительных глубинах (от 100—200 до 500—1000 м) могут быть использованы ВЭЗ и сейморазведка. Главная задача обоих методов заключается в выделении водоносных (песчано-гравийных) и водоупорных (глинистых) комплексов. С помощью метода ВЭЗ, как правило, удается хорошо изучить кровлю мощных глинистых толщ. Значительно сложнее в таких условиях проследить их подошву: часто песчанистые породы под водоупором насыщены водами повышенной минерализации и по электрическому сопротивлению они слабо отличаются от вышележащих пород. Задача же расчленения на отдельные комплексы толщи терригенных пород, залегающих ниже регионального водоупора, для метода ВЭЗ вообще неразрешима. В то же время эта задача для сейморазведки не представляет существенных затруднений.

Расчленение терригенно-карбонатной толщи на отдельные горизонты. Такое расчленение необходимо при изучении артезианских бассейнов. Задача успешно решается с помощью сейморазведки. Однако при определенных условиях частичное решение можно получить и с помощью метода ВЭЗ. Наиболее типичны два случая: а) карбонатный комплекс мощностью в несколько сотен метров представляет собой переслаивание маломощных карбонатных и терригенных пород и залегает на кристаллическом фундаменте; б) карбонатная толща достаточно однородна, имеет мощность, измеряемую первыми сотнями метров, и подстилается толщей низкоомных терригенных образований, причем мощность пород рыхлого покрова, перекрывающего карбонатную толщу, незначительна. Особенности решений рассмотрим на примерах Русской платформы.

Первый случай наблюдается в южной части Московской синеклизы и Белоруссии, в зоне сводового поднятия. По кривым ВЭЗ при такой ситуации нельзя расчленить палеозойские породы на несколько горизонтов; они фиксируются в виде одного комплекса, проводимость которого зависит от обогащенности разреза терригенными породами. Второй случай изучен на площади, прилегающей к Тиманскому кряжу (Б. В. Боревский, 1970 г.). Кривые ВЭЗ четким максимумом r_k отделяют карбонатную толщу в целом от подстилающих ее более древних пород, отличающихся глинистым составом и соответственно низким сопротивлением.

Для расчленения толщи, состоящей из высокоскоростных карбонатных и сульфатно-галогенных пород и низкоскоростных терригенных образований, наиболее приемлем метод отражен-

ных волн (МОВ). Большой опыт таких работ накоплен по Русской платформе. Здесь в палеозойской толще пород выделена серия отражающих границ, связанных с горизонтами глинистых пород, залегающих среди карбонатных. Тем самым удается хорошо проследить водоупорные породы. Методом отраженных волн можно также выделить среди карбонатных галогенные породы, которые также являются водоупорными.

Выявление локальных складчатых структур. Эта задача часто возникает при изучении платформенных, предгорных и межгорных артезианских бассейнов. Основными методами выявления локальных структур служат ВЭЗ, грави- и сейсморазведка. Однако в отличие от поисков нефтегазовых структур при гидрогеологических исследованиях месторождений минеральных вод ведущее место принадлежит не сейсморазведке, а ВЭЗ. Связано это со сравнительно малой глубинностью гидрогеологических исследований, изучением более контрастно выраженных структур, экономическими соображениями и другими причинами.

Для обнаружения методом ВЭЗ локальных структур необходимо изучать морфологию опорного горизонта, четко отражающего тектонику. При неглубоком залегании фундамента поверхность последнего может служить для этой цели. При погружении его на большую глубину изучаются менее глубоко залегающие опорные горизонты. Например, в условиях Западной Сибири четким маркирующим горизонтом являются низкоомные глины чеганской свиты. На территории Русской платформы хорошим опорным горизонтом служит поверхность карбонатно-сульфатного комплекса. При глубине 300—500 м методом ВЭЗ могут быть выявлены структуры с амплитудой 100—150 м (М. В. Шнайдер, 1969 г.). Некоторую помощь может оказать при этом расчленение рыхлого покрова на серию горизонтов и соответственно изучение их морфологии.

Помимо палеточного способа интерпретации при выявлении локальных поднятий и прогибов целесообразно изучение карт продольной проводимости S . Вследствие того, что в зонах антиклинальных поднятий часто выклиниваются глинистые горизонты, а минерализация подземных вод может быть несколько уменьшена, величина S еще более резко, чем изменение глубин, подчеркивает особенности тектоники.

Возможности гравиметрии в выявлении локальных структур хорошо известны. Например, на площади Волго-Камского бассейна структуры с амплитудой по кровле карбонатного комплекса в 50 м фиксируются аномалиями 0,2—0,3 мгал. Более благоприятные условия для обнаружения локальных структур имеются на территории молодых платформ, где контрастные интенсивные движения способствуют созданию заметных гравитационных аномалий.

При малой эффективности ВЭЗ и гравиразведки приходится

использовать сейсморазведку; однако такие исследования ведутся в ограниченных объемах.

Выявление и прослеживание зон разломов. При поисках и разведке минеральных вод особенно важно выявить молодые тектонические, а следовательно, и гидрогеологически активные разломы. Ширина зон разломов и сопутствующих им зон эндогенной трещиноватости варьирует от первых десятков до 200—300 м, реже более. Выявить такие структуры геологическими методами в закрытых районах чрезвычайно трудно. Здесь роль геофизической разведки особенно высока. При всем многообразии геолого-геофизических характеристик зон разломов можно выделить три типичных случая.

1. Наиболее легко прослеживаются крупные разломы с вертикальным смещением блоков, отличающихся различным составом пород (а следовательно, и различными физическими свойствами) при малой мощности сравнительно однородных наносов. При такой обстановке (она типична для трещинных массивов) хорошие результаты можно получить с помощью электропрофилирования, дополняемого в необходимых и благоприятных условиях магниторазведкой, а иногда и гравиразведкой.

2. Более сложным является случай, когда разлом проходит по однотипным породам, а их вертикальное смещение геометрически не фиксируется. Это также характерно для трещинных массивов. Для обнаружения такого разлома могут быть использованы, помимо электропрофилирования, методы естественных потенциалов (ЕП), вызванных потенциалов (ВП), сейсмо-, магнито- и гравиразведка, термометрия, эманационная съемка.

Электропрофилирование дает положительные результаты, если в зоне разлома из-за повышенной трещиноватости снижено электрическое сопротивление пород. Заметное снижение сопротивления наблюдается при прохождении разлома в массивных породах. Если по разлому длительно циркулируют термоминеральные воды, это особенно способствует уменьшению электрического сопротивления пород, причем не только массивных, но и рыхлых песчано-глинистых. В этом случае влияют не только повышенные температуры и минерализация подземных вод, но и существенная переработка (дезинтеграция) под их воздействием вмещающих пород. Разлом может быть выявлен также в результате резистивиметрических и термометрических наблюдений в горных выработках, источниках подземных вод, придонной части поверхностных водоемов [5]. Четкая линейная прослеживаемость геофизических аномалий свидетельствует о связи их с зоной разломов.

Иногда над зонами разломов фиксируются слабые аномалии естественного или вызванного электрического поля (ЕП, ВП). Они могут быть обусловлены либо фильтрацией подземных вод сквозь рыхлые породы, либо окислительно-восстанови-

тельными реакциями, связанными с сульфидной минерализацией в зоне разломов.

Целесообразно в рассматриваемых условиях применять КМПВ. Зоны разломов, особенно при гидротермальной переработке пород, отличаются резким снижением граничных скоростей v_g , сейсмическая запись становится нерегулярной, быстро затухающей. Имеются еще и другие приемы, которые облегчают выделение зон разломов. Лишь высокая стоимость работ сдерживает широкое применение сейсморазведки.

Эффективность магнито- и гравиразведки в условиях однородного разреза может быть увеличена за счет проникновения по разломам магматических пород (в виде жил, даек), выноса с глубин магнетита или резкого ослабления магнитности пород в связи с их дроблением или гидротермальной переработкой. В отдельных случаях положительные результаты дает применение микромагнитной съемки даже при отсутствии в разрезе магматических пород [80].

Эманационная съемка, отмечающая в приповерхностной части разреза продукты радиоактивного распада, также позволяет в некоторых случаях фиксировать разломы. Целесообразно одновременно с ней проводить гелиевую съемку [30].

3. Наиболее сложно изучать разломы в условиях артезианских бассейнов под покровом осадочных пород. Из геофизических методов для их выявления и прослеживания используются электроразведка (ВЭЗ), сейсмо-, грави- и магниторазведка.

Молодые платформы, как известно, отличаются достаточно контрастной тектоникой, что позволяет применять метод ВЭЗ. Например, в условиях Сырдарьинского, Чу-Сарысуйского, Тургайского и других артезианских бассейнов с помощью метода ВЭЗ по резкому перепаду отметок опорного горизонта (складчатого основания, представленного домозойскими породами) можно проследить разломы. Однако интерпретация полученных результатов не всегда однозначна, так как крутое погружение маркирующей поверхности может дать тот же эффект. При сравнительно малом перепаде отметок изучаемой поверхности выявление разломов по ВЭЗ становится крайне ненадежным; в этом случае только данные сейсморазведки (КМПВ по поверхности фундамента или МОВ по горизонтам в мезо-кайнозое) могут дать окончательное решение вопроса. Следует отметить, что привлечение данных гравимагнитных наблюдений способствует обнаружению крупных зон разломов.

В условиях древних платформ основным методом выявления разломов служит сейсморазведка; часто она применяется в комплексе с грави- и магниторазведкой.

Геологическое картирование массивных пород под покровом рыхлых песчано-глинистых отложений. Задача заключается в прослеживании границ различных литолого-петрографических комплексов пород. Решение

ее обусловлено составом, тектоникой картируемых образований, мощностью и однородностью рыхлого покрова. При картировании особенно важно выделять потенциально водообильные породы. Наиболее частым является случай, когда исследуются породы кристаллического фундамента (в области древних щитов, центральных массивов и т. п.) или складчатых сооружений каледонского, герцинского и более молодого возраста под маломощными (не более нескольких первых десятков метров) наносами. Коренные породы интенсивно дислоцированы, вследствие чего прослеживаются, как правило, крутые контакты различных пород.

В целях картирования коренных пород в рассматриваемом случае могут быть использованы электропрофилирование в комплексе с магниторазведкой, гравиметрией или радиометрией. Электропрофилирование дает обычно максимальную информацию; учет величины электрического сопротивления, характера графиков r_k (спокойный, пилообразный и т. п.), особенностей их в приконтактовой зоне и других признаков позволяет вести картирование с большим эффектом при минимальных затратах средств. При наличии магматических и метаморфических пород можно электропрофилирование сочетать с магниторазведкой. Это один из наиболее часто встречающихся комплексов. Однако иногда и такой комплекс является недостаточным. Например, метаморфические сланцы по геоэлектрическим и магнитным свойствам зачастую не отличаются от известняков. В данном случае проследить контакт возможно и с помощью гравиметрических наблюдений. Иногда гранитный массив нельзя выделить среди вмещающих пород ни одним из названных методов; при соответствующих составе и мощности наносов в некоторых случаях эта задача может быть решена с помощью эманационной съемки.

Существенно меняется методика исследований при погружении рассмотренного выше картируемого комплекса пород на глубину 100--200 м и более. На таких глубинах уже практически невозможно, а иногда и экономически ненецелесообразно картирование с той детальностью, как это делается при маломощных наносах. В этих условиях основными методами картирования становятся электроразведка (ВЭЗ), магнито- и сейсмоприведка. Использование метода ВЭЗ при картировании основано на изучении асимптотических значений r_k (установливаемых по правым ветвям кривых ВЭЗ). Результаты магниторазведки при малых и больших глубинах различаются несущественно. Во втором случае фиксируется лишь более генерализованная картина. Знание глубин до картируемых пород, устанавливаемых по ВЭЗ и другими методами, облегчает интерпретацию графиков магнитных аномалий.

Особенно хорошие результаты при картировании пород, залегающих на большой глубине, дает КМПВ: граничные скорости

v_r по поверхности фундамента (или складчатого основания) четко дифференцируют на отдельные разности исследуемые породы. Например, максимальные значения v_r отмечаются в массивных карбонатных породах, минимальные — в сланцевых толщах. При наличии параметрических замеров у скважин и на обнажениях можно по КМПВ выделить достаточное число градаций пород [47].

Изучение трещиноватости и закарстованности массивных пород. В методическом плане исследования трещиноватости карбонатных, магматических и метаморфических пород несколько различаются.

Изучение трещиноватости карбонатных пород (известняков, доломитов, мергелей, мела) включает: выявление и оконтуривание по площади участков, отличающихся повышенной трещиноватостью, оценку мощности трещиноватых пород, определение направления доминирующей системы трещиноватости и некоторые специальные карстологические исследования (выявление карстовых воронок и полостей и т. п.). В этих случаях используют методы ВЭЗ, КВЭЗ, ВЭЗ-ВП (или ЭП-ВП), ЭП, сейсморазведку КМПВ; при специальных карстологических наблюдениях привлекают дополнительно гравиразведку, резистивиметрию, термометрию, метод заряженного тела (МЗТ) и естественных потенциалов ЕП [9, 22, 26, 27, 55, 72].

Метод ВЭЗ применяется для выявления под покровом рыхлых отложений зон повышенной трещиноватости в массивах карбонатных пород и оценки мощности трещиноватых пород [55]. Однако оценить их мощность удается лишь при весьма интенсивном характере трещиноватости и закарстованности. При такой обстановке на кривых ВЭЗ, в условиях полного влагонасыщения разреза, фиксируется перегиб типа А. Если же уровень грунтовых вод проходит в верхней части карбонатного разреза, фиксируются ВЭЗ типа КН [26, 55]. При глубоком залегании карбонатных пород косвенными признаками, указывающими на повышенную трещиноватость этих образований, являются антиклинальные формы складок. В зоне поднятий, как правило, под влиянием растягивающих усилий трещиноватость карбонатных пород увеличена, в прогибах — резко сокращена.

Метод КВЭЗ дает дополнительную информацию о трещиноватости карбонатных пород. При этом в качестве основы интерпретации используются методические приемы, разработанные А. А. Огильви [55]. В большинстве случаев коэффициент кажущейся анизотропии λ_K невелик, порядка 1,05—1,2. Лишь иногда он достигает 1,5—1,8. Установление по КВЭЗ слабой анизотропности карбонатных толщ, однако, не свидетельствует об отсутствии на исследуемой площади участков с трещиноватыми водообильными породами.

Выявление и особенно прослеживание трещиноватых и за-

карстованных пород — одна из задач, наиболее эффективно решаемых с помощью ЭП. Она решается в комплексе с другими геофизическими методами. В результате многолетних исследований, проводимых в центральных районах РСФСР [22], установлена серия диагностических признаков, совместный учет которых позволяет с достаточной степенью вероятности дать однозначный ответ. К числу таких признаков, свидетельствующих о наличии трещиноватых водообильных пород, относятся: а) пониженное электрическое сопротивление пород; б) пилообразный характер графиков r_k , фиксируемых при электропрофилировании; в) четкая прослеживаемость минимумов и максимумов r_k от профиля к профилю; г) увеличенное значение кажущейся анизотропии λ_k ; д) приуроченность отмеченных выше аномалий к эрозионным глубоким врезам в карбонатные породы; е) малая мощность рыхлого покрова, перекрывающего карбонатную толщу; ж) отсутствие в разрезе этого покрова водоупорных (обычно глинистых) пород. Все эти признаки устанавливаются по данным электроразведки.

В последние годы при обработке графиков ЭП используются приемы математической статистики. В частности, изучается коэффициент вариаций значений r_k : значительная изрезанность графиков сопротивления свидетельствует о трещиноватости и водообильности карбонатных пород [22].

Изучение трещиноватых карбонатных пород с помощью метода ВП выполнено пока еще на ограниченном числе объектов. Установлено, что по методу ВП отмечаются заметные аномалии τ_k в зоне трещиноватых водообильных известняков.

Весьма эффективным методом при изучении трещиноватости и закарстованности карбонатных пород является сейсморазведка (КМПВ). Резкое снижение граничной скорости v_r преломленных волн при наличии трещиноватых пород среди массивных хорошо известно по многим районам страны [9, 47 и др.]. Вместе с уменьшением v_r отмечается быстрое затухание упругих колебаний, уменьшение их частоты, нерегулярная запись. Оценить же полную мощность трещиноватой зоны, которая, как известно, может достигать 50 м и более, по результатам сейсморазведки обычно не удается, выделяется лишь самый верхний наиболее разрушенный маломощный горизонт. Сниженными граничными скоростями v_r , однако, характеризуются и неводообильные заглущенные карбонатные породы. Разделить трещиноватые и заглущенные породы практически только по величине v_r до сих пор не удается. Видимо, следует изучать не только продольные волны, но и поперечные, которые, как показано Н. Н. Горяиновым [20], при прохождении по водообильным породам быстро затухают.

Помимо электро- и сейсморазведки для выявления областей интенсивной трещиноватости и связанной с ней закарстованности пород можно использовать также методику, рекомендо-

ванную И. А. Брашниной [9] и получившую дальнейшее развитие в работах Г. С. Семенова [72]. Она заключается в изучении региональных гравитационных и магнитных аномалий, выявлении по их данным зон крупных разломов в фундаменте и сопоставлении этих разломов с расположением древних долин рек и зон интенсивной трещиноватости и закарстованности, между которыми установлена закономерная связь. Особенная ценность этой методики в том, что для ее использования привлекаются обычно имеющиеся материалы, полученные при различных съемках.

Специальные карстологические исследования, связанные с поисками и разведкой минеральных вод, сводятся главным образом к выявлению карстовых крупных горизонтально протяженных полостей (пещер) в массивах пород. Для этого применяются методы ВЭЗ, ЭП, ЕП и значительно реже гравиразведка. По ВЭЗ возможно выделение лишь крупных карстовых воронок (диаметром 50–100 м и более) при сравнительно маломощном покрове рыхлых пород и при весьма детальной сети наблюдений. По морфологии изучаемой поверхности легко установить природу выявляемого «провала» опорного горизонта. Резкое искажение кривых ВЭЗ косвенно указывает на наличие карстовой воронки. Более эффективно использовать ЭП при выявлении участков интенсивного карста. С помощью метода ЭП можно по минимумам r_k обнаружить не только крупные, но и мелкие карстовые воронки и другие формы эрозионного рельефа. Через карстовые воронки часто идет питание или разгрузка подземного потока, это создает аномалии естественного электрического поля и может быть зафиксировано методом ЕП. Крупные карстовые полости могут быть отмечены при высокоточных гравиметрических наблюдениях. Однако обычно такие аномалии весьма незначительны и выявление их требует проведения крупномасштабных (1:2 000 - 1:5 000) гравиметрических съемок с сечением изоаномал 0,05–0,10 мгл, что связано с большими затратами.

Изучение трещиноватости различных метаморфических и магматических пород включает решение примерно такого же круга частных задач, за исключением специальных карстологических исследований. Трещиноватость в некарбонатных породах, как правило, является менее интенсивно выраженной, поэтому ее изучение в таких условиях более затруднительно. К числу основных геофизических методов при изучении трещиноватости некарбонатных пород относятся электроразведка (ВЭЗ, ЭП) и сейсморазведка. Дополнительными методами являются КВЭЗ, ВП, магниторазведка.

Использование электроразведки постоянным током и сейсморазведки основано на том, что трещиноватые водообильные породы отличаются сравнительно пониженным сопротивлением, скорость распространения упругих волн в них уменьшена. Ме-

тод КВЭЗ часто не достаточно эффективен, так как трещиноватость в рассматриваемых образованиях намного слабее, чем в карбонатных породах. Метод ВП (в модификациях профилирования и зондирования) пока еще применяется лишь в опытном порядке. В отдельных случаях повышенные значения r_k отмечаются у пород с увеличенной трещиноватостью.

По магниторазведке зоны интенсивной трещиноватости фиксируются зачастую сниженными аномалиями ΔZ . Сложным вопросом является отделение трещиноватых пород от заглинизованных, так как те и другие характеризуются сходными аномалиями. Лишь совместное рассмотрение в каждом конкретном районе серии геофизических, геологических, гидрогеологических, ландшафтных и некоторых других признаков позволяет сузить неоднозначность решения.

Изучение динамики подземного потока. Геофизическое решение ряда гидрогеологических задач, проанализированное выше, в значительной мере способствует изучению динамики подземного потока. Ниже рассматриваются геофизические исследования, специально ориентированные на выявление характеристик, связанных с движением подземных вод.

Выявление мест питания и разгрузки подземных вод, выяснение гидравлической связи напорных и грунтовых вод, а также подземных и поверхностных. Задача решается с помощью методов ВЭЗ, КМПВ, ЕП, резистивиметрии и термометрии.

По методу ВЭЗ можно получить лишь косвенное решение задачи. Например, если напорные воды отличаются повышенной минерализацией, породы в области их разгрузки характеризуются аномально низким электрическим сопротивлением.

Участки гидравлической связи напорных и грунтовых вод можно также прогнозировать на основе структурных построений, в результате которых выявляются гидрогеологические «окна». Например, обнаружение с помощью метода ВЭЗ или КМПВ под покровом рыхлых отложений карстовых воронок, заполненных песчаным (но не глинистым) материалом, выявление зон разломов, оконтуривание участков, где в результате речной эрозии (или других причин) уничтожены глинистые породы регионального водоупора, свидетельствуют о возможной гидравлической связи напорных и грунтовых подземных вод.

Метод ЕП издавна применяется в гидрогеологии для установления мест питания и разгрузки подземных вод, для выявления гидравлической связи грунтовых и поверхностных вод. Однако метод ЕП при наблюдениях с дневной поверхности в связи с сравнительно малой величиной фильтрационных потенциалов, искажающим влиянием рельефа местности и незначительной глубинностью часто становится малоэффективным. В последние годы для выявления участков разгрузки напорных вод в субмаринных условиях стали использовать резистивиметрию в ком-

плексе с ЕП, термометрией и некоторыми другими методами [5, 9].

Определение направления и скорости фильтрации подземного потока. Обычно эта задача решается для неглубоко циркулирующих безнапорных вод. Наиболее разработанный прием связан с использованием околоскважинных наблюдений по методу заряженного тела (МЗТ). Направление подземного тока устанавливается также путем изучения гипсометрии зеркала грунтовых вод (см. ниже). При интенсивном движении подземного потока, особенно при локализации его в пределах узкой полосы, можно наблюдать и другие аномалии, например изменение вдоль потока естественной электрической поляризации. Если воды этого потока отмечаются также высокой минерализацией или повышенной температурой, можно отметить соответствующие аномалии электрического сопротивления и температуры пород приповерхностного слоя разреза.

Определение уровня грунтовых вод. Задача решается методом ВЭЗ и МПВ. Эффективность того и другого метода резко меняется в зависимости от геологических условий. Изучение глубины до уровня грунтовых вод (УГВ) в терригенных породах с использованием лишь метода ВЭЗ осуществляется с большой, обычно практически недопустимой погрешностью. Это, однако, не исключает его применения в комплексе с сейсморазведкой: можно разредить сеть сейсмических наблюдений, использовав для надежной интерполяции наблюдения по методу ВЭЗ.

При сейсмических исследованиях наиболее простым является случай, когда уровень грунтовых вод проходит в песках или песчано-гравийных толщах. Погрешность в определении глубины до УГВ равна 1—1,5 м при мощности зоны аэрации до 20—25 м. Резко ослабевает скоростная дифференциация разреза и ухудшаются возможности метода, когда грунтовые воды насыщают породы, обогащенные глинистым материалом (суглинки, глинистые пески), так как часто зоны аэрации и малых скоростей не совпадают. Однако одновременное использование продольных и поперечных волн [19], а также совместное рассмотрение данных ВЭЗ и результатов неглубокого бурения позволяют сделать интерпретацию однозначной даже в сложных условиях.

Значительно больший эффект дают результаты ВЭЗ при определении уровня грунтовых вод в интенсивно трещиноватых скальных (особенно карбонатных) породах в условиях расщепленного рельефа. Резкий перепад сопротивлений сухих и увлажненных пород сопровождается в реальных условиях отсутствием переходной (градиентной) зоны сопротивлений [26, 55]. Использование электроразведки особенно необходимо, поскольку методика сейсморазведки в этих условиях еще не разработана.

Определение уровня и пьезометрической поверхности напорных вод. Установление нижней границы

водоупорной толщи позволяет определить уровень (глубину залегания) соответствующего напорного горизонта. Значительно сложнее выявить пьезометрическую поверхность напорных вод. Изучение фильтрационных свойств пород и граничных условий потока позволяет по комплексу геофизических и опытных гидрогеологических данных решить задачу с помощью моделирования или математических расчетов [46, 62].

Оценка водообильности пород. В настоящее время по ряду объектов, приуроченных к артезианским бассейнам, найдена корреляционная связь между водообильностью пород и их геофизическими параметрами.

При оценке водообильности рыхлых песчано-глинистых пород используются данные электроразведки постоянным током (преимущественно ВЭЗ) и в опытном порядке — ВЭЗ-ВП. Общей закономерностью для песчано-глинистых пород, залегающих ниже уровня грунтовых вод, является увеличение их электрического сопротивления по мере обогащения хорошо проницаемыми разностями — песком, гравием, галечником, валунами. Поляризуемость пород η_k , устанавливаемая с помощью метода ВП, наоборот, увеличивается при обогащении песчано-гравийных отложений глинистым материалом, т. е. при уменьшении водообильности пород. В отдельных случаях удается перейти от чисто качественных характеристик к полукачественным оценкам водообильности отложений. Корреляционные связи, установленные по параметрическим ВЭЗ и ВЭЗ-ВП у скважин, можно распространить на всю площадь разведки. При отсутствии же достаточно представительного по объему материала для составления корреляционных связей можно использовать геофизические данные лишь для правильной рисовки карт гидрогеологических параметров на межскважинных участках [46].

Сравнительная или полукачественная оценка водообильности трещиноватых пород может быть установлена прежде всего при известной величине удельного электрического сопротивления. Снижение электрического сопротивления массивных пород в большинстве случаев связано с увеличением их трещиноватости и, как следствие, водообильности. Это дало возможность ряду авторов [22, 65] выявить по ограниченным участкам четкую связь между удельным дебитом совершенных скважин, с одной стороны, и электрическим сопротивлением пород ρ или их продольным электрическим сопротивлением T_3 , с другой. Использование скоростных параметров для количественной оценки водообильности трещиноватых пород, по всей вероятности, также вполне возможно. Об этом свидетельствует опыт сейсморазведки в гидротехническом строительстве [70], а также эксперименты Н. Н. Горяинова [20], В. М. Паханова (1976 г.) и других на интрузивных породах Приазовья.

Оценка фильтрационных свойств водоупорных (слабопроницаемых) пород. С позиций геофизиче-

ских исследований водоупорные породы также следует разделить на две категории: а) глины и глиноподобные образования; б) массивные слаботрещиноватые породы.

Водоупорные свойства однородных глин достаточно хорошо могут быть изучены методом ВЭЗ по анализу их мощности h , величине сопротивления ρ и продольной проводимости $S=h/\rho$. Для этих пород фильтрационные свойства, как правило, улучшаются с обогащением их песком и соответственно увеличением электрического сопротивления. В настоящее время накоплен достаточный опыт изучения таким способом региональных глинистых водоупоров артезианских бассейнов по многим районам страны [46].

Значительно сложнее исследовать водоупорные свойства массивных образований (плотные известняки, доломиты, мергели, галогенные породы и др.). Снижение трещиноватости, отсутствие разломов, рассекающих массивные породы, общее увеличение мощности таких пород — все это делает их водоупорными. Для решения поставленной задачи могут быть использованы электро- и сейсморазведка. Так, например, в Днепровско-Донецкой впадине методом ВЭЗ четко отбивается высокоомный горизонт — мощная мел-мергельная толща, являющаяся здесь региональным водоупором. В центральных районах Русской платформы гипсонасочные толщи в девоне также служат региональным водоупором. Их поверхность при сплошном распространении весьма надежно фиксируется методами ВЭЗ и КМПВ.

Изучение гидрохимических условий. Эти исследования подземных вод можно свести к решению нескольких задач.

Установление контуров участков с пресной и соленой водой. Методика решения этой задачи меняется в зависимости от состава пород и глубины их погружения. Наиболее разработана методика при изучении грунтовых вод в рыхлых песчано-глинистых породах. Задача решается в основном методом ВЭЗ, а при малых глубинах — сочетанием ВЭЗ, ЭП и ЕП. В некоторых случаях помочь в интерпретации оказывают результаты сейсморазведки.

При большой мощности зоны аэрации по ВЭЗ не всегда можно надежно оценить сопротивление пород зоны насыщения грунтовыми водами. Например, низкоомные глинистые прослои зоны аэрации можно спутать с низкоомными песчано-глинистыми породами, насыщенными высокоминерализованными водами. Параллельное определение уровня грунтовых вод с помощью сейсморазведки делает в таком случае интерпретацию более однозначной.

Особенно сложна задача разделения напорного водоносного горизонта на участки с пресными и солеными водами. Наиболее простое решение заключается в изучении гипсометрии исследуемого горизонта. В области антиклинальных структур

можно ожидать сравнительно пресные воды, синклинальных — соленые. Более надежными являются оценка величины электрического сопротивления исследуемого глубокого горизонта (с помощью метода ВЭЗ в комплексе с электрокаротажем скважин) и последующее изучение многомерных связей этой величины со степенью минерализации, температурой и литологическим составом вмещающих пород [46].

Хуже разработана методика выделения участков пресных и соленых вод в трещиноватых породах. Как и для терригенных образований, отмечается резкое снижение сопротивления трещиноватых пород, насыщенных минерализованными водами, что способствует решению задачи. В условиях Русской платформы при особенно высокой минерализации подземных вод могут даже наблюдаться «провалы» опорного электрического горизонта, приуроченного к поверхности карбонатного комплекса. Однако указанные критерии сами по себе не надежны. Аналогично могут проявляться зоны повышенной трещиноватости и глинизации карбонатных пород. Решение будет более однозначным, если привлечь другие методы, в частности сейсморазведку. Например, если по сейсморазведке не фиксируется снижение граничной скорости v , по поверхности карбонатного комплекса, а по ВЭЗ отмечается резкое уменьшение сопротивления ρ , с большей степенью вероятности можно утверждать наличие минерализованных вод в этих породах.

Для обнаружения участков карбонатных пород с повышенной минерализацией подземных вод можно использовать некоторые дополнительные признаки, устанавливаемые также по данным ВЭЗ. Так, например, повышенная минерализация подземных вод вышележащих терригенных пород, как правило, свидетельствует о наличии в этом районе высокоминерализованных вод в нижележащих породах.

Параллельно с оконтуриванием участков распространения пресных и соленых вод часто возникает дополнительная задача, заключающаяся в оценке мощности зоны пресных вод. Она решается с помощью метода ВЭЗ в условиях мощных толщ преимущественно терригенных пород при отсутствии в ней высокоменных экранов для постоянного тока. В Волго-Камском районе мощность зоны пресных вод можно оценить, когда нижняя граница ее проходит в толще пород верхнего терригенного комплекса [39]. В таких случаях фиксируются кривые со следующим соотношением сопротивлений горизонтов:

$$\rho_1 \geq \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 \rightarrow \infty,$$

где ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 — соответственно сопротивления поверхностных отложений, терригенных пород, насыщенных пресными водами, терригенных пород, насыщенных высокоминерализованными водами, опорного электрического горизонта (карбонатно-галогенные породы). Аналогичная картина наблюдается на Сахалине

[37], в восточной части Западно-Сибирской низменности [46], во внутренней зоне Предкарпатского прогиба [81] и других местах. Однако использование лишь одного метода ВЭЗ вносит иногда неопределенность при расшифровке природы низкоомного горизонта, имеющего сопротивление ρ_3 . Его низкое сопротивление может быть связано как с насыщением разреза солеными водами, так и с наличием мощных глинистых толщ. Такая же неопределенность часто возникает при изучении крупных линз пресных вод в пустыне. Привлечение сейсморазведки способствует однозначности ответа: если КМПВ и ВЭЗ фиксируется одна и та же граница, она соответствует литологическому контакту (пески -- глины), если же границы различные, то, по всей вероятности, ВЭЗ отмечает смену минерализации подземных вод.

Оценка степени минерализации подземных вод. Задача решается с помощью метода ВЭЗ примерно теми же способами, как это описано выше (при оконтуривании участков с пресными или минерализованными водами). Методическая особенность заключается в установлении по достаточно представительному числу гидрогеологических скважин корреляционных зависимостей между величиной сопротивления ρ и минерализацией M подземных вод исследуемого горизонта. Методика разработана лишь для песчано-глинистых пород. Подчеркнем, что более целесообразно при оценке минерализации подземных вод использовать не парные, а многомерные связи, позволяющие учитывать также влияние на величину ρ литологического состава пород и других факторов [46].

Выявление радионовых вод. С помощью эманационной съемки можно оконтуривать участки с увеличенным содержанием радона в почвенном воздухе. Такие наблюдения способствуют обнаружению радионовых вод. Радиометрические наблюдения целесообразно сочетать со структурными более глубинными геофизическими методами исследований для того, чтобы обнаружить водовыводящий канал. Аналогичная ситуация имеет место при изучении зон разгрузки термальных вод (см. ниже).

Изучение гидрогеотермических условий. По геофизическим данным можно оконтурить участки разгрузки термальных вод в приповерхностной части разреза и осуществлять глубинное геотермическое прогнозирование.

Оконтуривание участков разгрузки термальных вод. Для реализации этой задачи можно использовать термометрическую съемку и электроразведку.

Интерпретация термометрических данных достаточно проста. Она заключается в выявлении положительных аномалий температур. Основное внимание интерпретатора ориентировано на введение поправок с целью исключения разного рода помех, а также учета нормального теплового поля [58, 60, 80]. Однако

не всегда надежно установленная температурная аномалия соответствует в плане глубинной зоне разгрузки термальных вод, так как из-за интенсивного движения грунтовых вод зафиксированный температурный фокус может быть значительно смешен по отношению основного канала, выводящего термальные воды и представляющего реальный интерес. При такой ситуации необходимо применять наряду с терморазведкой и другие геофизические методы (например, электропрофилирование, магнито-, сейсморазведку и т. п.), позволяющие изучить глубинную структуру участка. Особенно важное значение приобретает определение наклона зоны разлома, по которой поступают термальные воды. Представляет также интерес установление по одиночным скважинам скорости и направления грунтового потока методом заряженного тела (МЗТ).

Использование геоэлектрических наблюдений (методами ВЭЗ или ЭП) при выявлении зон разгрузки термальных вод основано на снижении электрического сопротивления пород, отличающихся повышенной температурой. Обнаружение минимумов сопротивлений в определенных условиях можно связать с зоной растекания термальных вод. Иногда в зоне разгрузки последних отмечаются также аномалии ЕП. Особенно легко их выявить при исследовании водоемов [5].

Глубинное геотермическое прогнозирование. Оно осуществляется в области артезианских бассейнов. Прогнозировать можно в несколько стадий и различными путями. Вначале заключения о геотермических условиях бассейна носят качественный характер и делаются на основе анализа структурно-тектонических материалов. Области глубоких прогибов, занимающие обширные площади, рассматриваются как основные потенциальные резервуары термальных вод. Поскольку для разведки особый интерес представляют участки, где термальные воды залегают на минимальной глубине, в прогибах и их склонах выделяются локальные положительные структуры, зоны разломов, участки, где отсутствуют водоупорные породы.

Количественная оценка температуры пород и заключенных в них подземных вод осадочного покрова основана на геотермических измерениях в глубоких скважинах. Поскольку последние расположены на больших расстояниях друг от друга, встает вопрос об обоснованной интерполяции скважинных замеров на межскважинные пространства. Один из широко применяемых приемов интерполяции основан на изучении закономерностей распространения в районе величины геотермического градиента Γ [42]. Однако недостаток этого метода заключается в использовании для расчетов стандартных значений геотермического градиента $\Gamma = \xi q_t$ (q_t — величина теплового потока, ξ — удельное тепловое сопротивление пород). Поскольку величины q_t и ξ в пределах бассейна не стабильны, вертикальный градиент Γ температур изменяется по площади и разрезу довольно резко; это

приводит при недостаточном числе скважин к ошибкам при оценке температур.

Более рациональный путь заключается в том, что результаты наземных геофизических наблюдений используются не только для определения глубин, но и для оценки физических параметров среды, а это позволяет, в свою очередь, осуществлять непосредственно геотермическое прогнозирование; точность результатов при этом повышается.

Наличие четкой корреляционной связи между тепловым сопротивлением ξ , с одной стороны, и плотностью пород σ и скоростью распространения в них упругих волн v , с другой, позволяет записать следующие соотношения [46]:

$$t = \frac{t_0}{H_0} H \frac{b + \sigma_{\text{ср эф}}}{b + \sigma_{\text{ср0 эф}}},$$
$$t = \frac{t_0}{H} H \frac{\alpha - (v_{\text{пл}}/H)}{\alpha - (v_{0 \text{ пл}}/H)},$$

где t — прогнозируемая температура на глубине H ; t_0 — известная по скважинным замерам температура¹ на глубине H_0 ; $\sigma_{\text{ср эф}}$ и $v_{\text{пл}}$ — соответственно средняя эффективная плотность и пластовая скорость в слое мощностью H_0 ; $\sigma_{\text{ср эф}}$ и $v_{\text{пл}}$ — то же, в слое мощностью H ; b и α — постоянные величины, характерные для изучаемых разрезов. Глубинное прогнозирование температур описанным способом обеспечивает среднеквадратичную погрешность от $\pm 2 \div 3$ до $\pm 5 \div 10^\circ\text{C}$.

Изучение геокриологических условий. Основными методами исследования геокриологических условий являются ЭП, ВЭЗ и термометрия в мелких горных выработках, к которым в условиях трещиноватых массивов прибавляется магниторазведка, а иногда и гравиразведка. В последние годы, помимо названных методов, начинают использовать ВЭЗ-ВП, сейсморазведку, инфракрасную аэроразведку.

Изучение глубоких и сквозных таликов. Эти талики могут быть связаны с широкими речными долинами или озерными впадинами преимущественно в области артезианских бассейнов, или с зонами разломов в области трещиноватых массивов, по которым поступают вверх воды повышенной температуры. В общих случаях основным методом исследований является ЭП, дополняемый ВЭЗ. В наиболее сложных случаях может быть использовано также сейсмопрофилирование. Кроме того, в области трещиноватых массивов часто с успехом применяются магнито- и гравиразведка.

Определение мощности многолетнемерзлых пород. Для решения задачи используется метод ВЭЗ в комплексе с геотермическими замерами в скважинах. Слой мерзлых

¹ Температуры t и t_0 отсчитываются от температуры «нейтрального» слоя.

пород на кривых ВЭЗ фиксируется в виде четкого максимума кажущихся сопротивлений. Интерпретация кривых ВЭЗ в условиях распространения в разрезе мерзлых толщ отличается значительной спецификой в связи с явлениями сезонного порядка, наличием градиентного изменения электрического сопротивления пород и т. п. [1]. При мелкомасштабных исследованиях артезианских бассейнов приближенные сведения о мощности многолетнемерзлого слоя можно получить также по МОВ [16]; способ основан на резком отличии скорости упругих волн в мерзлых и талых породах.

Скважинные геофизические методы

Задачи и специфика каротажных исследований. При поисках и разведке месторождений минеральных вод используются геофизические методы исследования скважин, аналогичные применяемым при разведке на нефть, газ и другие полезные ископаемые. Основными являются различные модификации электрического и радиоактивного каротажа, термометрия, расходометрия, газовый каротаж и методы контроля технического состояния скважин. Эффективность и объем каротажных работ на различных объектах неодинаковы, однако они в любом случае способствуют повышению темпов разведки и значительному снижению себестоимости разведочных работ.

Исследования выполняются стандартной аппаратурой, рассчитанной на высокие пластовые давления (до 1000 кгс/см²) и температуры (120--200°), условия эксплуатации ее практически одинаковы при проведении геофизических работ в скважинах различного целевого назначения. Конструктивные особенности аппаратуры и методика работ подробно излагаются в специальных руководствах [48, 50] и в связи с этим здесь не рассматриваются. Остановимся только на некоторых особенностях использования геофизических методов при решении геологических задач месторождений минеральных вод.

Результаты геофизических исследований наряду с другими материалами устанавливают направленность работ и необходимые мероприятия на всех этапах и стадиях геологоразведочного процесса и разработки месторождения. Задачи скважинной геофизики определяются стратификацией и литологическим расчленением разреза, поисками критериев выделения коллекторов, оценкой их эффективной мощности, пористости, глинистости, изучением анизотропии водо-коллекторских и физических свойств разреза, а в благоприятных случаях -- оценкой проницаемости коллекторов, минерализации пластовых вод и других параметров, необходимых для характеристики геологического строения, определения перспектив разреза на воду, разработки и контроля за эксплуатацией месторождения.

Поисково-разведочные работы на минеральные воды часто связаны с бурением и испытанием дорогостоящих глубоких скважин, расположенных по редкой сетке. В связи с этим геофизические исследования — по существу основной источник информации при оконтуривании перспективных площадей по условиям их залегания. Эффективность геофизических работ особенно очевидна при сокращении числа скважин на месторождении за счет более рационального их использования, совмещения функций разведочных и эксплуатационных скважин, а также при выявлении объектов минеральных вод в пределах ликвидированных нефтегазовых и других месторождений, когда пространственное положение водоносных комплексов и их мощности уточняются при ревизии фонда старых скважин. Несмотря на это, в гидрогеологической службе и, в частности, при разведке минеральных вод при исследовании скважин долгое время ограничивались постановкой только электрокаротажных работ (запись кривой ПС и кривых КС одним-двумя зондами). В последние годы в обязательный комплекс работ введен гамма-каротаж (ГК), реже — термометрия, резистивиметрия, газовый каротаж, дебитометрия и некоторые виды радиоактивного каротажа (НГК, ГГК-П и т. д.). Геофизические работы в гидрогеологических скважинах проводятся или геофизическими отрядами с узким диапазоном специализации, выполняющими ограниченный комплекс методов (КС, ПС, ГК) и не имеющими возможностей проведения более сложных исследований, или на подрядных началах по заказной системе геофизиками-нефтяниками, которые в свою очередь не всегда располагают временем из-за большого объема собственных работ и резервным оборудованием, удовлетворяющим условиям проводки гидрогеологических скважин и геолого-гидрогеологическим особенностям месторождений.

До сих пор комплекс и методика геофизических работ в области гидрогеологии, особенно при поисках и разведке месторождений минеральных вод, еще не отработаны. При анализе материала не всегда учитывается специфика месторождений (высокие температуры, широкие диапазоны минерализации пластовых вод, высокие пластовые и геостатические давления, характер коллектора, газовый фактор и т. д.), требующая постановки необходимых дополнительных исследований: термометрии, газового каротажа, дебитометрии скважин и отработки методики интерпретации каротажных кривых применительно к специфике месторождений.

Геологическое расчленение и качественные оценки геофизических параметров можно осуществлять с помощью стандартного комплекса исследований, но лучше использовать и другие методы. Это очевидно, так как водосодержащими проницаемыми пластами являются различные группы горных пород. Для различных типов месторождений характерны следующие основ-

ные системы коллекторов, имеющие определенную специфику исследования геофизическими методами при решении поставленных задач.

1. Коллекторы с межзерновым типом пористости: рыхлые и сцепментированные песчано-глинистые породы осадочного комплекса (кварцевые, полимиктовые, аркозовые). Минеральный состав, отсортированность и заглинизованность позволяют обнаруживать их в разрезе по совокупности характерных геофизических признаков.

2. Коллекторы с карбонатным типом пористости в бассейнах осадочных пород и в районах молодого вулканизма и постмагматических процессов: трещинно-кавернозные известняки, доломиты, песчаники, магматические, метаморфические и изверженные породы при наличии в них значительной вторичной пористости, трещин и зон выщелачивания (вулканогенные туфы, туффиты). Результативность геофизических методов исследования при изучении коллекторов указанного типа определяется спецификой геолого-гидрогеологической обстановки.

Рыхлые образования (аллювий, моренные отложения, лёссы, морские пески и глины, озерные пески и глины и другие) встречаются в разрезах практически всех типов месторождений минеральных вод. Для выделения их используют в первую очередь электро- и радиоактивный каротаж. Существенную помощь при расчленении разреза скважины могут оказать данные кавернометрии, когда рыхлым разностям разреза соответствуют значительные изменения диаметра скважины. Эффективность геофизических исследований в скважинах во многом определяется плотностью сети скважин, точностью их документации.

Электрокаротажные диаграммы (рис. 1) позволяют изучать литолого-структурные особенности рыхлых образований на основании наблюдения за распространностью водонепроницаемых глинистых и торфяных отложений, слоями вулканического пепла, лавовыми потоками и другими маркирующими пластами разреза при корреляции геофизических диаграмм. Распространение проницаемых зон проследить трудно, особенно если разрез представлен тонким чередованием проницаемых и водоупорных прослоев. В таком случае вместо обычного стандартного комплекса исследований (КС, ПС) рекомендуется проводить трехэлектродный боковой каротаж и микрозондирование.

В низкопористых отложениях, к которым относятся разрезы, содержащие карбонатные породы (известняки и доломиты) или сцепментированные песчаники, коллекторами являются проницаемые разности, обычно обладающие повышенной пористостью. Ввиду отсутствия надежных геофизических методов для выделения проницаемых пород поиски коллекторов в рассматриваемых разрезах сводятся к выделению более обводненных интервалов. В таких условиях проницаемые интервалы обычно четко отличаются по показаниям микрозондов, данные которых особенно

ценны, когда проницаемые прослои имеют небольшую мощность. Наряду со стандартным электрокаротажем основным методом является нейтронный гамма-метод. Хорошо зарекомендовал себя и метод повторного электрокаротажа при смене бурого раствора.

Трещинные породы наиболее трудны для изучения геофизическими методами. Определение трещинной пористости по дан-

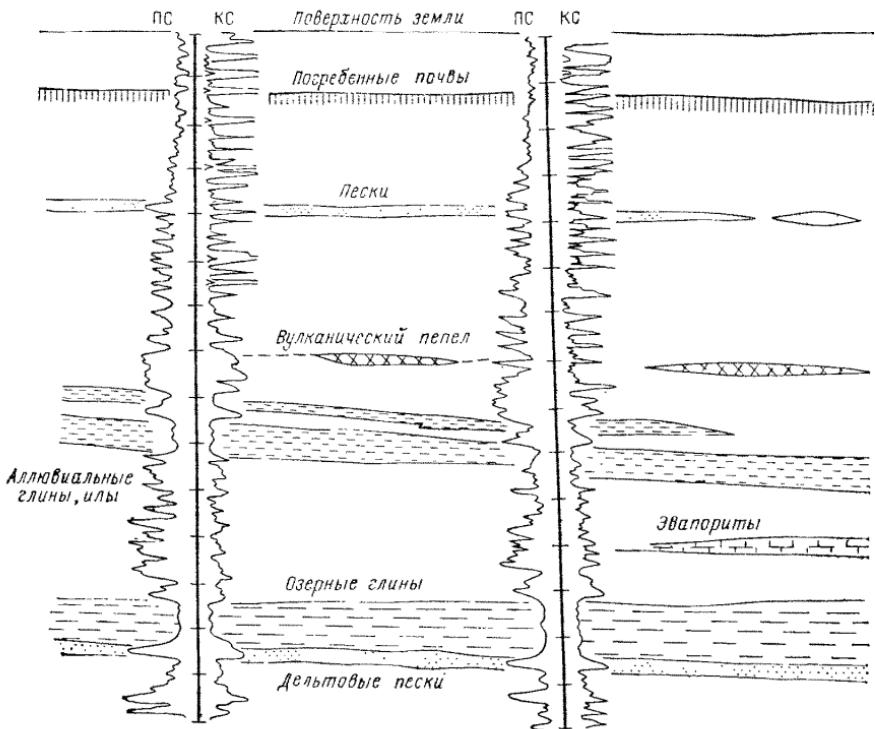


Рис. 1. Изучение геофизическими методами разреза аллювиальных отложений (по С. Дэвис, 1973 г.)

ным каротажа производится только в благоприятных случаях. Обычно объем пустот, обусловленный трещиноватостью породы, крайне незначителен (доли процента). В связи с этим наличие трещин в породе заметно не отражается на показаниях геофизических методов, характеризующих ее пористость. Вследствие того, что трещиноватость карбонатных пород наблюдается, как правило, в низкопористых породах, комплекс геофизических методов скважин аналогичен предыдущему. Однако получаемые результаты при этом используются главным образом для расчленения разреза на отдельные горизонты, и только в редких случаях удается выделить в нем трещинные зоны. Для реше-

ния последней задачи стали применять метод повторного бокового каротажа, метод двух растворов, сочетание методов КС и НГК расходометрию.

Магматические и метаморфические породы, первичная эффективная пористость которых очень низка, становятся коллекторами при наличии значительной трещиноватости и развитии процессов выщелачивания. Среди магматических пород коллек-

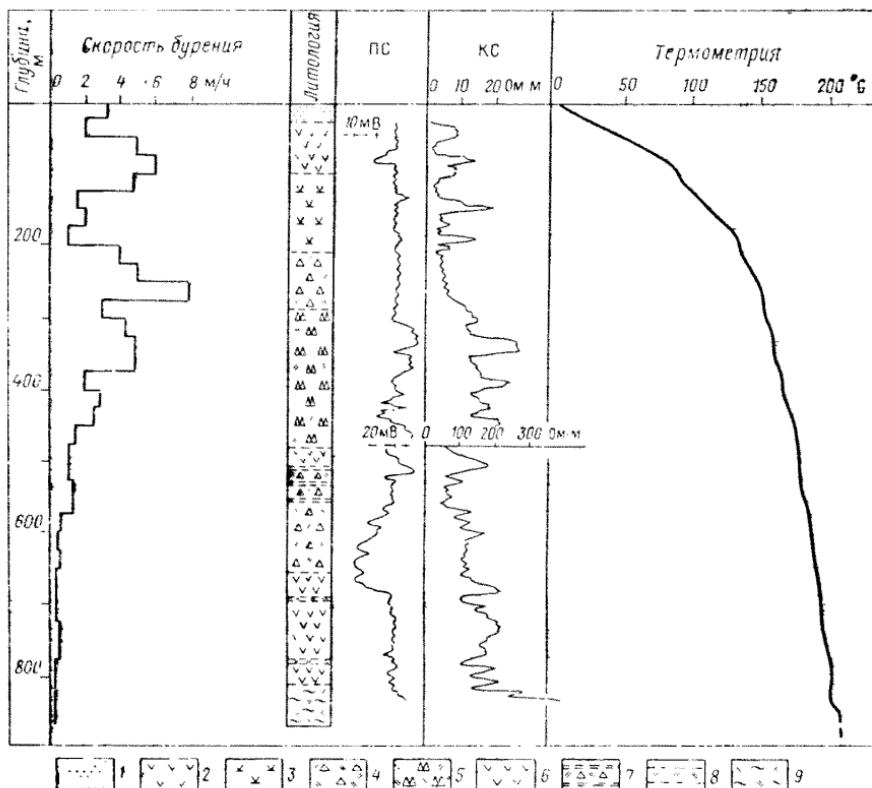


Рис. 2. Данные по разведочной скв. 2 геотермальной площади Северный Хатимантай (Япония) (по К. Сате, 1975 г.).

1 — покровная порода; 2 — андезитовая лава; 3 — измененная порода; 4 — дакит-андезитовая туфобрекция; 5 — андезитовый лапиллиевый туф; 6 — андезит; 7 — песчаный туф; 8 — пемзовый туф; 9 — дакитовый спекшийся туф

торы приурочены к коре выветривания основных (серпентинитов, габбро), из эфузивных отложений коллекторами бывают вулканогенные туфы и туффиты, которые по своим геофизическим свойствам близки к песчано-глинистым коллекторам с высокой степенью цементации. Изучение этого типа разреза ограниченным комплексом исследований (КС, ПС, термометрия) в некоторых случаях дает положительные результаты (рис. 2) [33]. Породы названного типа сложны для изучения их метода-

ми каротажа без дополнительной корректировки методики измерений и интерпретации геофизических данных. Примеры комплексного изучения этого типа разреза методами геофизики и особенности интерпретации материалов будут рассмотрены ниже.

Объем скважинных исследований месторождений минеральных вод проводится узким комплексом, что, как уже указывалось ранее, определяется геологическими, техническими и экономическими причинами. В этом случае достоверность, однозначность и высокая геологическая эффективность конечных результатов исследования возможны только при извлечении максимальной геолого-геофизической информации о разрезе при анализе и обобщении всех имеющихся геологических, геофизических, геохимических и промысловых данных прошлых лет по скважинам различного целевого назначения (опорным, параметрическим, нефтегазовым, рудным, по скважинам на подземные и промышленные воды и др.).

В пределах платформенных месторождений и предгорных и межгорных артезианских бассейнов и склонов, изученность которых на другие полезные ископаемые достаточно велика в пределах Советского Союза, это не составляет затруднений. Исследования должны быть направлены на решение геологических задач, но в первую очередь на выбор или разработку специальных методов интерпретации геофизических данных, учитывающих геолого-гидрогеологические особенности (глинистость, карбонатность коллекторов, их характер пористости, минерализацию, загазованность пластовых вод, высокие пластовые и геостатические давления и температуры).

При изучении месторождений, расположенных в областях молодого и современного вулканизма, задача извлечения информации из материалов прошлых лет исследования затрудняется слабой изученностью разреза, особенно геофизическими скважинными методами. В этом случае широко привлекаются методы полевой геофизики, а также рекомендуется проводить специальные исследования прямыми методами (термометрия, резистивиметрия, дебитометрия, газовый каротаж).

Рассмотрим возможности основных методов геофизического исследования скважин, не только имеющих в настоящее время широкое распространение в области изучения месторождений минеральных вод, но и перспективных с точки зрения использования их для изучения характерных для месторождений типов коллекторов.

Методы каротажа скважин. Электрокаротаж. Эти исследования при бурении скважин на воду являются одним из наиболее распространенных и важных видов работ и основаны на процессах прохождения электрического тока по стволу скважин и в прискважинной зоне и сводятся к регистрации наведенного электрического поля (КС) и потенциала самопроиз-

вольно возникающего электрического поля (ПС) в пройденных скважиной горных породах.

Электрокаротаж по методу сопротивления (КС) имеет несколько модификаций: каротаж трехэлектродными установками (стандартный каротаж потенциал- и градиент-зондами различного радиуса исследования), боковое каротажное зондирование (БКЗ), каротаж установками с фокусировкой электрического поля (боковой и индукционный), каротаж микроустановками (микрозонд, резистивиметр). Модификации различаются по степени глубинности исследования прискважинной зоны и в совокупности описывают изменение удельного электрического сопротивления пород по радиальному профилю от оси скважины. При этом резистивиметром измеряется удельное электрическое сопротивление бурового раствора в скважине; микрозонды, стандартный зонд малого размера и зонды малой длины (менее 0,5 м) из комплекта БКЗ позволяют получать осредненную величину сопротивления всей зоны проникновения и оценивать его характер. При боковом каротаже, по методу БКЗ и с определенной долей приближения по большим градиент-зондам (более 4 м) рассчитывается истинное сопротивление пород разреза.

Радиальная неоднородность прискважинной зоны по сопротивлению является предпосылкой использования методов электрометрии при выделении коллекторов и определении их истинного удельного сопротивления. Наилучший эффект достигается при удачном комплексировании как минимум двух модификаций электрометрии, которые выбираются в зависимости от геолого-гидрогеологических условий разреза. Различие в электрических свойствах горных пород обусловливается главным образом изменением их минерального состава, структуры, влагонасыщенности, степени минерализации флюида, температуры породы и флюида. Минералы, составляющие горные породы, за редким исключением проводят электрический ток, поэтому электропроводность горной породы обусловлена электропроводностью пластовой воды, заполняющей поры. В связи с этим присутствие пластовой воды, количество ее в единице объема и распределение по породе (тип пористости) определяют прохождение электрического тока по породе.

Коллекторы пластово-порового типа (пески, песчаники, алевролиты), содержащие минерализованные воды и рассолы (условно более 5–6 л), характеризуются низкими удельными сопротивлениями порядка 0,5–5 Ом·м; коллекторы этого же типа при насыщении их пресными или слабоминерализованными водами имеют удельное сопротивление от 5 до 50–60 Ом·м и выше. Наиболее эффективно использовать электрокаротажные методы при изучении коллекторов с высокой степенью минерализации вод, когда последняя превышает минерализацию бурового раствора (удельные сопротивления находятся в обратной

зависимости). В этом случае надежными признаками коллектора являются наличие зоны повышающего проникновения раствора (БКЗ), положительные приращения на кривых микропроникновения и отрицательные аномалии кривой ПС (рис. 3).

Использование электрокаротажа для изучения коллекторов с пресными и слабосолеными водами имеет свои особенности. Наблюдения показывают, что глубина зоны проникновения и коллекторские свойства пласта не всегда коррелируют между собой и в некоторых случаях нет основания связывать отсутствие зоны проникновения с плохими фильтрационными свойствами пласта. Поскольку бурение скважин на месторождениях проводится на воде или растворах, минерализация которых близка к минерализации пластовых вод, проникновение бурового раствора в проницаемые пачки разреза, даже если оно и происходит, не может быть надежно установлено по данным каротажа (сопротивление зоны проникновения близко к сопротивлению пласта).

Так, например, в разрезе Махачкалинского месторождения водообильным песчаным пачкам караганского и чокракского возраста, содержащим воды низкой минерализации, соответствуют различные типы фактической кривой БКЗ: в интервалах 966—999 и 1260—1306 м отмечаются соответственно зоны понижающего ($\rho_p < \rho_{пл.в}$) и повышающего проникновения ($\rho_p > \rho_{пл.в}$). Двухслойный тип кривой БКЗ соответствует неоднородной пачке песчаников (1398—1500 м), минерализация вод которых близка к минерализации бурового раствора; зона проникновения не фиксируется зондами БКЗ малого размера (см. рис. 3). В некоторых случаях в водообильных частях разреза зона проникновения отсутствует. Это обстоятельство объясняется тем, что возникающее в пласте гидравлическое сопротивление вследствие напорного характера вод не только препятствует проникновению раствора, но и вызывает обратное движение из пласта в скважину. Эффективность решения задач качественной интерпретации можно повысить, если метод рассматривать в совокупности с другими методами каротажа.

В то же время именно малая глубина проникновения раствора в пласт является благоприятным обстоятельством при определении его истинного сопротивления, особенно если располагаем ограниченным набором электрокаротажных методов, в частности, когда по данным стандартного каротажа старого фонда нефтегазовых и других скважин необходимо выявить в разрезе коллектор и оценить его удельное электрическое сопротивление и возможные параметры зоны проникновения.

Карбонатные породы (известняки, доломиты) отмечаются высокими удельными сопротивлениями, от десятков до сотен ом-метров, и глубокими отрицательными амплитудами на кривой ПС. Наибольшее сопротивление наблюдается у плотных разностей; пористые кавернозные и трещинные породы харак-

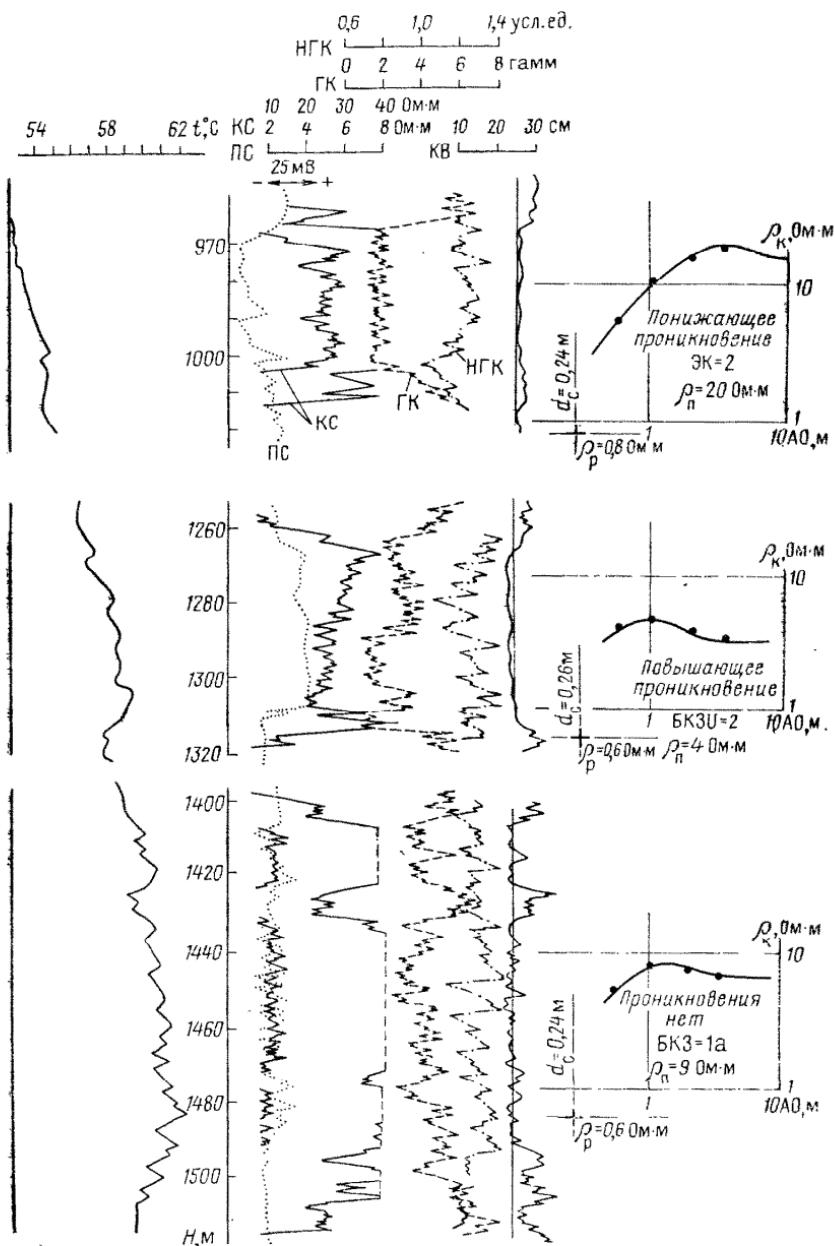


Рис. 3. Комплексная интерпретация геофизических кривых в песчано-глинистых породах при смене минерализации пластовых вод в разрезе Махачкалинской площади (по данным З. А. Водоватовой, 1972 г.)

теризуются тем меньшим сопротивлением и амплитудой ПС, чем выше их глинистость. Повышение минерализации пластовых вод приводит к снижению удельного сопротивления и росту отрицательных аномалий на кривой ПС.

Объективные трудности в интерпретации электрокаротажных кривых для карбонатного разреза состоят в следующем. Значительные глубины проникновения раствора по порам, трещинам и кавернам часто исключают возможность выделения коллекторов по зоне проникновения. В этом случае используется методика потенциал-зондов большого размера или комплексирование методов КС и НГК. Последнее основано на различии в показаниях методов, поскольку вид кривой НГК слабо зависит от структуры порового пространства и определяется общим водородосодержанием породы (ее общей пористостью), тогда как удельное электрическое сопротивление существенно зависит от ее структурных особенностей и характеризует открытую пористость. Затруднительно однозначно выделять разные по типу пористости карбонатные коллекторы (гранулярные, трещинные, трещинно-гранулярные, кавернозные, карстовые, смешанные и другие), что, очевидно, связано с их различными фильтрационными способностями при одинаковой пористости. В настоящее время наиболее изучен гранулярный тип коллекторов; методики исследования других типов находятся в стадии разработки.

Метод потенциалов собственной поляризации и ПС. Он используется для корреляции разреза, выделения коллекторов. Благоприятной предпосылкой для этого служит то, что против некоторых геологических разностей кривая ПС имеет характерную конфигурацию, отражающую последовательность наслоения их в процессе осадкообразования. По кривым ПС можно установить изменение характера напластования, например линзовидное залегание пластов, выклинивание или несогласие.

Амплитуда кривой самопроизвольной поляризации в разрезе месторождений минеральных вод чаще всего является результатом суммарного действия диффузионно-адсорбционного и фильтрационного явлений на границе скважина — пласт. Метод используется как при качественной интерпретации, так и для количественных расчетов эффективных мощностей глинистых коллекторов (карбонатов, песков, песчаников) и минерализации пластовых вод. Показания метода не свободны от влияния структурных и литологических особенностей разреза, термодинамического режима, а также определяются условиями проводки скважин (соотношением концентраций бурового раствора и пластовых вод, диаметром скважины и др.), поэтому минерализация пластовых вод часто оценивается на качественном уровне (например, больше или меньше она минерализации бурового раствора, каково соотношение минерализации пластовых вод в раз-

личных частях разреза или в исследуемом интервале).

Кривая ПС, хотя и не является мерой пористости, служит индикатором пористых интервалов в разрезе. Если скважина заполнена пресным буровым раствором ($\rho_p > \rho_{плв}$), то каждое отклонение кривой ПС в сторону отрицательных потенциалов указывает на наличие пористой зоны.

Радиометрия скважин. На месторождениях минеральных и термальных вод используются методы гамма-каротажа (ГК) нейтронного гамма-каротажа (НГК), плотностного гамма-гамма-каротажа (ГГК-П), обеспеченные стандартной аппаратурой и методикой количественной интерпретации результатов.

С помощью гамма-каротажа измеряют естественную радиоактивность или самопроизвольный распад химических элементов, присутствующих в горных породах. Метод ГК имеет ряд преимуществ, основным из которых является его большая проникающая способность, позволяющая проводить исследования в старых обсаженных скважинах, где ранее не был проведен каротаж, и в условиях, когда метод ПС по техническим причинам проводки скважины или из-за близости промышленных объектов не дает положительных результатов при расчленении разреза. Положительной особенностью метода также является его малая чувствительность к изменению диаметра скважины, параметрам зоны проникновения, соотношению минерализаций бурового раствора и пластовых вод и другим специфическим фактором, характерным для месторождений минеральных вод.

Естественная радиоактивность пород обусловлена содержанием в них радиоактивных элементов или радиоактивных вод. Величина интенсивности γ -излучения в различных породах неодинакова. Повышенную активность имеют сланцы, обогащенные органическим веществом, глины и породы, содержащие примеси глинистого материала. Очень высокой γ -активностью могут обладать риолитовые туфы и некоторые виды песчаников (полимиктовые). Низкая γ -активность свойственна обычно песчаникам, известнякам и доломитам.

Универсальных правил интерпретации данных гамма-каротажа не существует, однако опыт некоторых районов позволяет создавать региональные критерии интерпретации этих данных. На первоначальной качественной стадии интерпретации кривые ГК могут быть использованы при расчленении разреза по степени заглинизированности и при оценке эффективных мощностей коллекторов.

Глинистость коллектора – один из главных факторов, определяющих его фильтрационные свойства (эффективную пористость и проницаемость). В связи с этим кривые гамма-каротажа, отвечающие в первом приближении распределению глинистых фракций в породах разреза, используются для сравнительной характеристики разреза по степени фильтрационной

неоднородности, особенно когда эту характеристику разреза затруднительно получить по данным ПС и КС. В связи с большой γ -активностью глинистых минералов относительно γ -активности большинства минералов скелетной составляющей у коллекторов, особенно у кварцевых и карбонатных, наблюдается четкая связь между естественной радиоактивностью пород и их глинистостью. С увеличением весовой глинистости от 0 до 40% естественная радиоактивность пород увеличивается для большинства районов Советского Союза почти по линейному закону [23]. Подобные зависимости, установленные для различных районов страны, можно использовать при оценке глинистости коллекторов с последующей сравнительной оценкой их фильтрационных свойств. Предпосылкой существования таких соотношений для каждого изучаемого разреза является постоянство минерального состава глин и их удельной активности в исследуемом интервале, а также кварцевый состав песчаной фракции и отсутствие в ней глауконитовых и других радиоактивных примесей.

Нейтронный гамма-каротаж (НГК) основан на изучении интенсивности вторичного γ -излучения, возникающего при радиационном захвате нейтронов ядрами элементов горной породы. Интенсивность вторичного γ -излучения определяется в основном замедляющими и поглощающими свойствами горных пород и прежде всего водородсодержанием. Природный водород заключен преимущественно в воде, поэтому активность, наблюдаемая на каротажной диаграмме, находится в обратной зависимости от общего водосодержания природной среды, окружающей скважину (свободной и связанной воды). Минимальные показания кривой соответствуют глинистым пачкам, имеющим большую пористость за счет содержания в них связанной воды. Сцементированные малопористые известняки, доломиты, ангидриты, плотные песчаники отмечаются наибольшими значениями на кривой НГК. Другие осадочные породы (песчаники, пески, пористые карбонаты) характеризуются промежуточными показаниями, определяющимися их пористостью и глинистостью.

Метод НГК в совокупности с другими методами промысловой геофизики используется для расчленения разреза, выделения коллекторов и оценки их пористости, особенно в карбонатных породах, где он используется в совокупности с методом КС и где другими методами решить эту задачу затруднительно. При наличии в породе глинистой составляющей уменьшение пористости почти полностью компенсируется увеличением содержания связанной воды. Это приводит к резкому снижению дифференцированности кривой. При исследовании песчано-глинистых пород или заглинизованных карбонатов оценка их пористости может производиться только при условии специального учета их глинистости. В то же время метод хорошо использовать при

расчленении разреза по литологическим признакам, уточнении интервалов залегания и эффективных мощностей водородсодержащих пачек разреза, которые независимо от степени минерализации вод (в интервалах се низких значений) выделяются высокими или средними амплитудами кривой НГК, если в разрезе отсутствуют плотные разности.

Термометрические исследования. В скважинах они являются одним из наиболее важных и практически необходимых видов геофизических исследований, поскольку могут быть использованы для решения широкого круга вопросов: изучения естественного геотермального поля скважин, изучения литологических и тектонических особенностей геологического разреза, оценки физических параметров горных пород и пластовых вод и корректной интерпретации материалов других видов каротажа. Термометрические исследования предназначаются также для определения мест притока и затрубной циркуляции вод в скважине, для контроля за ее техническим состоянием и технологией бурения, а на более поздней стадии для разработки рационального режима эксплуатации месторождения.

Термометрические исследования скважин для разведки месторождений минеральных вод применяются очень давно, еще в 1906 г. А. Н. Огильви впервые предложил использовать этот метод. В 30-е годы аналогичные исследования проводились им в пределах КМВ и на Мацестинских источниках. Начиная с 40-х годов в разработку геотермии активно включаются гидрогеологии, уже шире применив материалы термометрии для изучения особенностей месторождений термоминеральных вод (А. М. Овчинников, П. Ф. Швецов, Ф. А. Макаренко, Н. А. Огильви). В настоящее время геотермические исследования проводятся в скважинах месторождений термоминеральных вод почти повсеместно. Однако с помощью термометрии часто выполняют лишь стандартные замеры температурного поля скважины и контроль за ее состоянием и только в некоторых случаях устанавливают места притока подземных вод в скважину. Это объясняется недостаточным исследованием проблемы использования обычной промысловой термометрии для решения геологических задач, поскольку запись выполняется практически в нестационарном тепловом режиме (через 10—15 сут после окончания бурения) и отражает скорее процесс формирования и опробования скважин, чем реальное распределение геотермического поля месторождения. Скважины остаются пока еще единственным источником надежной геотермической информации, поэтому решение проблемы определения тепловых параметров разреза на основании термограмм неустановившегося режима многие видят в совершенствовании методики измерения и в повышении точности учета искажающего влияния скважины на естественное тепловое поле пород [23, 24].

При наличии большого числа скважин на месторождении

предлагается использовать методы статистической обработки термограмм с целью определения усредненного для каждого конкретного района значения геотермического градиента. Есть рекомендации для применения метода «двух термограмм» (И. М. Кутасов, 1969 г.) для интерпретации данных точечных замеров температур в длительно простоявших скважинах, с помощью которого с достаточной эффективностью могут быть рассчитаны величины геотермического градиента и по двум термограммам неустановившегося режима (А. С. Джамалова, 1967 г.).

К субъективным причинам слабого использования термокаротажных данных при изучении термоминеральных вод можно отнести специфические особенности геологии и гидрогеологии месторождений минеральных и термальных вод, большие глубины залегания коллекторов, высокие пластовые давления, значительные температуры, загазованность вод, условия проводки скважин и другие факторы, требующие специальной подготовки скважины перед проведением работ, что не только экономически удороожает процесс разведки, но и требует отработки специальной методики исследования. Измерения температур в скважинах в условиях неустановившегося теплового режима (но не менее 15 сут покоя), несмотря на возможные ошибки в определении истинных величин, используются для выяснения границ потока вод, выявления максимальных температур как показателя потенциальной энергетической значимости проектируемых эксплуатационных скважин с уточнением направления движения минеральных вод и характера их циркуляции.

Термометрические исследования в условиях месторождений платформенного типа и склонов с моноклинальным падением слоев не представляют трудностей и проводятся аналогично исследованиям нефтегазовых глубоких скважин. Термометрическим работам в районах интенсивной складчатости при больших термопроявлениях или в областях молодого вулканизма должна предшествовать специальная подготовка скважин: длительная промывка их холодной пресной водой или качественным глинистым раствором для освобождения ствола от глинистой корки и достижения равномерного охлаждения его. Традиционные способы продавливания и оттартирования при термометрических замерах в интервалах водопритока заменяются единственно возможной комбинацией записи термограмм при неизменном положении уровня воды непосредственно после промывки скважины и его подъема, т. с. в условиях притока термальных вод.

Резистивиметрия. Этот метод предназначен для оценки электропроводности бурового раствора в скважине, что имеет решающее значение при интерпретации данных электрического каротажа. Он также применяется для послойной оценки фильтрационных свойств разреза и определения местоположения кол-

лекторов. Измерения проводятся скважинными резистивиметрами по схеме однополюсного зонда малого размера после промывки скважины и окончания в ней всех запланированных геофизических замеров (КС, ГК, ИГК, термометрии, кавернометрии и др.). Методика оценки коэффициента фильтрации по резистивиметрическим кривым широко опробована для различных типов коллекторов. Однако он практически не применим, если скважина плохо промыта или вскрыт многопластовый разрез с различными уровнями подземных вод, вызывающими перетоки вдоль ствола [7, 21].

Расходометрия. Метод, предложенный Н. А. Огильви в 1939—1940 гг., широкое применение в области гидрогеологии нашел лишь в 60-х годах к моменту разработки специальной аппаратуры, соответствующей специфике бурения гидрогеологических скважин.

Он состоит в измерении интенсивности водопритоков или водопоглощения по стволу скважины по крайней мере в двух режимах: при динамическом равновесии в скважине и ее возбуждении. Исследования проводятся глубинным расходомером при любом динамическом режиме опытных скважин (естественном перетекании подземных вод, откачке или нагнетании). Наиболее удобно работать в фонтанирующих скважинах, не требующих искусственного создания в них динамического режима. В результате измерений получают графики изменения осевого расхода потока по глубине скважины в различных режимах исследования. Предпосылкой использования расходограмм для изучения гидрогеологии месторождения является зависимость величины водопритоков (или водопоглощений) от фильтрационных свойств пласта.

Метод расходометрии позволяет составить представление о глубине залегания, мощности, водопроводимости, удельном дебите, гидравлическом напоре, коэффициенте фильтрации зон водопритоков. Проницаемые и непроницаемые разности можно различить по форме расходограммы, изменяющейся соответственно в зависимости от переменного и постоянного (или нулевого) расходов. Достоверность результатов метода повышается, если число ступеней изменения уровня больше двух.

Фильтрационные свойства выделенных зон оцениваются по исходным данным в зависимости от выбранной методики исследования по общепринятым уравнениям установившегося и неустановившегося режима [7, 21]. Обработка последних сложна как с точки зрения проведения наблюдений в скважинах, так и особенностей их интерпретации. Нередко в практике гидрогеологических исследований расходометрия выполняется лишь для получения сравнительных фильтрационных характеристик разреза.

Метод используется при оценке фильтрационной неоднородности различных типов геологических разрезов. Наибольшая

разрешающая способность наблюдается при изучении трещинных и трещинно-жильных коллекторов, неоднородность и анизотропия которых затрудняют их изучение другими геофизическими методами (рис. 4). Определяющими положительными факторами для эффективного использования расходометрии в этом случае являются особенности литологии разреза, устойчивость стенок скважины, наличие сосредоточенных водопритоков;

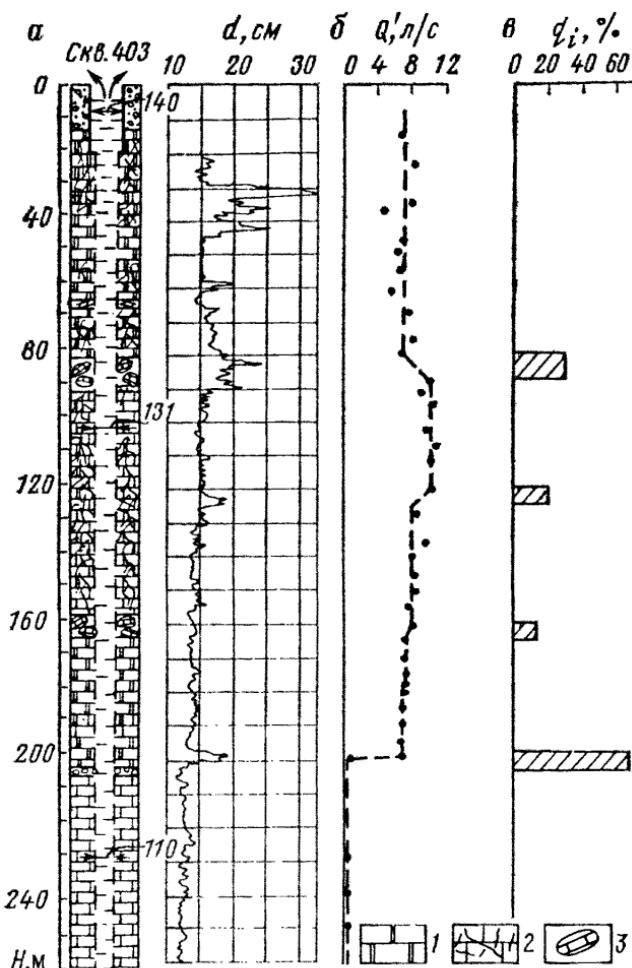


Рис. 4. Использование расходометрии при изучении неоднородности карбонатного разреза по скв. 403 на месторождении Беркуты в Южном Казахстане (по И. И. Гринбауму, 1975 г.).

а — кавернограмма; б — расходограмма; в — график удельного дебита водоносных интервалов; 1 — доломиты; 2 — известняки; 3 — зоны дробления

приуроченных к тектоническим трещинам и зонам дробления, а также условия бурения скважин (бурение с промывкой водой, исключающее заглинизированность зон притока, отсутствие обсадной колонны).

В породах осадочного комплекса в пластово-поровых коллекторах с межзерновым типом пористости расходометрия используется реже [21] из-за неустойчивости разреза, требующей постановки фильтра для всех проницаемых пластов, и тщательной его разглинизации перед замером для обеспечения совершенного характера вскрытия. При исследовании глубоких скважин в осадочных породах для ускорения работ удобно сочетать непрерывную и поточечную формы записи расхода осевого потока.

Кавернометрия. Этот метод позволяет получать диаграмму непрерывного изменения действительного диаметра скважины, которая используется при интерпретации других геофизических методов, при уточнении литологии разреза, установлении зон цементации и постановки фильтра. Для глин характерно увеличение диаметра скважины до 35—40 см, для песчаных пачек — его уменьшение за счет образования глинистой корки в местах инфильтрации бурового раствора в пласт. Однако известны случаи увеличения диаметра в интервалах рыхлых песков и слабо сцементированных песчаников. В условиях высоконапорных горизонтов минеральных вод нередки случаи увеличения диаметра по сравнению с его номинальным значением (глинистая корка неустойчива). Для карбонатных отложений характерны номинальные значения диаметра с увеличением последнего в местах распространения трещинно-кавернозных разностей.

Инклинометрия. Исследования этим методом осуществляются для обеспечения бурения ствола глубокой скважины в заданном направлении и контроля отклонения от него. Данные об искривлении ствола используются при определении истинных глубин залегания и эффективных мощностей водовмещающих пластов, а также при геологических построениях (геологогидрологические разрезы, структурные и другие карты).

Газовый каротаж. Этот вид каротажа основан на геохимических исследованиях глинистого раствора, поступающего из скважины при бурении. Заключается в определении параметров, характеризующих режим бурения, и переходе от этих параметров к количеству и составу газов в разрезе. Используется вариант метода, характерный для нефтегазовых месторождений, в случае загазованности пластовых вод месторождения в глубоких скважинах по известной методике [23].

С помощью описанных выше методов разнообразные геологогидрологические задачи при изучении месторождений минеральных вод полностью не решаются. В связи с этим необходимо привлекать дополнительные методы.

Боковой каротаж. Он является разновидностью электрического каротажа по методу сопротивления. Исследования осуществляются трех- или семиэлектродными зондами с фокусировкой тока, снижающей влияние скважины и вмещающих пород на величину сопротивления пород. Метод наиболее результативен при расчленении разреза; он обеспечивает точную отбивку границ коллекторов при тонком переслаивании терригенного разреза по сравнению с диаграммами метода КС.

Индукционный каротаж. Этот метод для изучения подземных вод в настоящее время практически не применяется. Его теория и приемы интерпретации могут быть использованы только после специальной их отработки с учетом особенностей гидрогеологических скважин. Однако преимущества метода заключаются в большой глубинности исследования, незначительном влиянии вмещающих пород и скважины, возможности более точного измерения удельного сопротивления в низкоомной части разреза.

Акустический каротаж. Метод основан на дифференциации горных пород по их упругим свойствам. Он имеет преимущества перед другими скважинными исследованиями и может быть использован при литологическом расчленении разреза, особенно в тектонически осложненных районах, в которых контуры месторождения контролируются либо зонами разрывных нарушений, смятия, дробления пород и приурочены к коре выветривания кристаллического фундамента, либо связаны с участками раздела стратиграфических подразделений.

III. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ПЛАТФОРМЕННЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ

Полевые геофизические методы

Полевые геофизические методы целесообразно использовать при поисках и предварительной разведке всех основных типов месторождений минеральных вод, приуроченных к платформенным артезианским бассейнам (см. табл. 2). Эти месторождения по своей практической ценности, геолого-гидрогеологическому строению и особенностям геофизической характеристики далеко не равнозначны. Геофизическая характеристика рассматриваемого типа месторождений в основном определяется литологическим составом пород. Можно выделить месторождения, в разрезе которых преобладают либо плотные карбонатные и хемогенные образования, либо рыхлые терригенные породы.

Геофизические исследования в условиях платформенных артезианских бассейнов отличаются от исследований других групп месторождений минеральных вод (за исключением месторождений грунтовых вод) наибольшей площадью изучаемых участков, наименьшей детальностью работ. Среди геофизических ме-

тодов ведущее место занимают электроразведка (ВЭЗ) и сейсморазведка (КМПВ, МОВ). Геофизические методы, основанные на регистрации прямого эффекта, связанного с образованием геофизических полей непосредственно от минеральной воды или от воздействия ее на окружающие породы, используются ограниченно. Широко привлекаются готовые геофизические материалы ранее проведенных исследований.

Месторождения грунтовых минеральных вод. Эти месторождения отличаются в большинстве случаев незначительной площадью распространения и малой глубиной залегания. Нам не известны примеры практического использования геофизических методов при их поисках и разведке, если не считать небольших работ, проведенных в 60-х годах В. С. Ванюковым в Кулундинской степи при поисках высокоминерализованных грунтовых вод. Тем не менее геофизические методы в определенных условиях, безусловно, нужно применять. С помощью геофизических методов можно литологически расчленить разрез и оценить мощность отдельных горизонтов; определить уровень, направление и скорость движения грунтовых вод; изучить процессы водообмена в зоне аэрации; провести специальные карстологические исследования, когда формирование минеральных вод связано с сульфатными или карбонатными породами; уточнить контуры месторождений. Для их решения могут быть привлечены методы, отличающиеся малой глубинностью и основанные на изучении естественных геофизических полей, возникающих в зоне изучаемых месторождений.

Для литологического расчленения разреза могут быть в основном использованы методы ВЭЗ и ЭП с малыми разносами. Часто важно определить мощность рыхлых пород, перекрывающих карбонатную толщу, из которой поступают сульфатные воды в зону торфяников, где происходит образование сульфидных вод. Также необходимо знать литологический состав пород (глины это или пески), в которых формируется минеральная вода. Например, образование радионовых вод иногда связано с адсорбией глинами радиоактивных элементов, которые ранее с водными потоками выносились в зону локальной разгрузки из больших глубин. В некоторых случаях представляет интерес определение фильтрационных свойств пород, перекрывающих горизонт, в котором образуется минеральная вода. Такое определение дает информацию, необходимую для оценки величины инфильтрации атмосферных и поверхностных вод в зону формирования минеральных. Целесообразно также установить величину влагопереноса в зоне аэрации по методике В. Н. Чубарова [83].

Уровень грунтовых вод в большинстве случаев может быть установлен с помощью инженерной сейсморазведки. Расположение зеркала грунтовых вод часто оказывает решающее влияние на формирование минеральных вод. Например, континентальное

засоление в аридной зоне происходит, когда мощность зоны аэрации не превышает 15—20 м [83].

Направление и скорость движения грунтовых вод при незначительной глубине их залегания легко определить методом заряженного тела (МЗТ). Решение этой задачи способствует выявлению участков с различным характером водообмена.

Карстологические исследования проводятся с целью обнаружения участков повышенной трещиноватости, закарстованности пород. В отдельных случаях, особенно когда изучаются мощные толщи гипсонасных пород, требуется выявлять подземные полости (пещеры). Для этого широко применяются методы электроразведки — ВЭЗ, ЭП, КВЭЗ, ЕП, иногда гравиразведка.

Оконтурирование месторождений минеральных вод является наиболее важной и ответственной задачей. Оно осуществляется прежде всего на базе решения перечисленных выше задач. Иногда в связи с малой глубиной исследования и наличием интенсивных геохимических процессов может быть получено прямое решение этой задачи. Так, эманационную съемку целесообразно использовать для оконтурирования месторождений радионуклидных вод. При изучении сульфидных вод, по-видимому, можно использовать термометрическую съемку, так как процесс сульфатредукции сопровождается интенсивным выделением тепла [80]. Естественные электрические потенциалы возникают при окислении пирита, и это может послужить основанием для применения метода ЕП. Концентрированные рассолы иногда образуются в непосредственной близости от соляных куполов, которые могут быть обнаружены по данным гравиразведки. Воды высокой минерализации и насыщенные ими породы отличаются весьма низким сопротивлением, что хорошо фиксируется электроразведкой. Таким образом, геофизические методы можно применять при изучении месторождений минеральных грунтовых вод.

Судя по размерам известных месторождений рассматриваемого типа, а также по сведениям о методике геофизической разведки пресных подземных вод [56], изучении этими же методами месторождений строительных материалов [8], исследований торфяников поисково-разведочные геофизические работы на минеральные грунтовые воды должны обеспечить построение резульвативных карт в масштабе 1 : 5000—1 : 25 000 и крупнее. Площадь исследований при этом может варьировать от нескольких до 10—30 га, реже более. Небольшая величина объектов и необходимость изучения в общем слабых геофизических аномалий требует густой сети наблюдений. По-видимому, расстояние между профилями может варьировать от 25—50 до 100—200 м, шаг наблюдений — от 2—5 до 20—50 м. Геофизические методы используются как при поисках, так и при разведке месторождений. Однако четкую грань между теми и другими видами работ провести затруднительно.

Месторождения, приуроченные к зонам разгрузки напорных вод в бассейны грунтовых (или слабонапорных) вод. Месторождения этого типа образуются, когда в водоупорной толще, отделяющей напорные минеральные воды от пресных грунтовых, имеются гидрологические «окна», которые создаются в местах тектонического разрыва водоупора, уменьшения его мощности, эрозионного размыва или фауниального изменения.

На стадии поисков основная задача геофизических методов заключается в выявлении участков, где происходит разгрузка напорных вод в грунтовые. Это можно сделать, непосредственно обнаружив очаг разгрузки в зоне активного водообмена, установив либо гидрологическое окно в водоупоре, либо повышенную вертикальную проницаемость в толще пород, где циркулируют минеральные воды.

Месторождения рассматриваемого типа по характеру проявления очагов разгрузки в геофизических полях можно разделить на две подгруппы. К первой отнесем месторождения с четко выраженным в геофизических полях очагом разгрузки напорных вод, ко второй — месторождения, в которых таковой явно не обнаруживается. Анализ начнем с первой подгруппы месторождений.

При интенсивной разгрузке напорных вод, когда они отличаются высокой минерализацией и повышенной температурой, по геофизическим данным удается непосредственно устанавливать очаги разгрузки. Наиболее ярко это наблюдается в карстовых областях, где имеется большое число водоемов, в которые разгружаются минеральные воды. Изучение электрического сопротивления придонного слоя, а также его температуры помогает обнаружить очаги разгрузки напорных минеральных вод [9, 85]. В некоторых местах, особенно в речных долинах, озерных котловинах, у побережья моря, т. е. там, где есть значительный перепад между пьезометрической поверхностью напорных и уровнем грунтовых вод, удается на локальных участках наблюдать аномалии ЕП, максимумы которых совпадают с фокусами разгрузки [56]. В зоне глубоко врезанных в коренные породы речных долин отмечается резкое снижение электрического сопротивления аллювиальных пород за счет насыщения их высокоминерализованными водами, которые разгружаются в эти долины. Масштаб результативных геофизических карт при поисках узколокализованных очагов разгрузки должен быть достаточно детальным — от 1 : 10 000 до 1 : 50 000 и даже крупнее (в зависимости от ожидаемых размеров очага разгрузки). Расстояние между профилями геофизических наблюдений может варьировать от 50—200 до 500—1000 м. В зависимости от конфигурации очага разгрузки отношение величины шага наблюдений к расстоянию между профилями колеблется от 1 : 1 до 1 : 3—1 : 4. Особенно детальной сеть наблюдений становится

при использовании метода ЕП. Он обычно применяется после проведения ВЭЗ и ЭП.

Наиболее простой является задача обнаружения очагов разгрузки высокоминерализованных вод в современные и древние долины. Поисковые работы заключаются в выявлении погребенных долин, а затем прослеживании их с одновременным обнаружением участков, где аллювиально-флювиогляциальные отложения, заполняющие долину, насыщены водой повышенной минерализации. Для обнаружения погребенных долин можно использовать ВЭЗ с $AB=1\div2$ км по сети наблюдений $2\div5 \times 0,5\div1$ км, а для поисков участков разгрузки минеральных вод — те же ВЭЗ с сетью наблюдений $(0,5\div1) \times (0,1\div0,25)$ км.

На практике малоглубинные геофизические методы обнаружения очагов разгрузки применяются, как правило, в сочетании с более глубинными. В числе последних привлекают ВЭЗ, с большими разносами AB_{\max} , в отдельных случаях сейморазведку (КМПВ или МОВ), гравиразведку и др. Глубинность исследований может достигать 500—1000 м, редко более, а площадь наблюдений — нескольких сотен квадратных километров. Профили наблюдений располагаются на расстоянии 500—2000 м друг от друга в зависимости от размеров ожидаемой структуры, к которой приурочено месторождение минеральных вод. Шаг наблюдений для ВЭЗ и гравиразведки колеблется от 200 до 500—1000 м. Сейсмические наблюдения выполняются в ограниченном объеме; обычно проходят 2—3 профиля, положение которых определяется результатами электроразведки и гравиметрии. Эти исследования структурного направления обеспечивают средний масштаб результативных построений — 1 : 100 000, 1 : 200 000.

На стадии предварительной разведки с помощью геофизических методов более детально решаются задачи, стоящие перед поисковой стадией. Кроме того, выясняется соответствие в плане между фиксируемым в приповерхностной части разреза очагом разгрузки и основной глубинной зоной, по которой идет вверх разгрузка минеральных вод. При наличии в разрезе карбонатных пород методами электро- и сейморазведки (КМПВ) изучается степень их трещиноватости и устанавливаются площади с максимальными ее значениями. В отдельных случаях с помощью МПВ изучается уровень грунтовых вод для выявления так называемых «куполов» засоления, образующихся в зоне разгрузки напорных вод. При разведочных работах по сравнению с поисковыми большее внимание уделяется структурным геофизическим методам; сеть наблюдений используется в 2—3 раза гуще, а масштабы результативных карт примерно в два раза крупнее. Участки исследований сравнительно небольшие — несколько десятков, иногда единиц квадратных километров.

Приведем несколько примеров использования геофизических методов при изучении месторождений первой подгруппы.

В 1937 г. под руководством М. П. Киселева-Федорова проводились разведочные геофизические работы на площади курорта Ключи, расположенного в Свердловской области, в 50 км к северо-западу от г. Красноуральска. Цель геофизических работ заключалась в обнаружении и прослеживании тектонической зоны трещиноватости в известняках карбона, по которой по предположениям гидрогеологов минеральная вода поднимается вверх и разгружается в виде малодебитных источников. Минерализация воды — 3—5 г/л. Бурение скважин в зоне разлома без данных полевой геофизики оказалось малоэффективным.

Наиболее древними породами на площади курорта являются названные выше известняки. Они залегают на глубине 40—50 м и образуют пологую антиклиналь, осложненную вторичной складчатостью. Антиклиналь вытянута в меридиональном направлении. Выше по разрезу залегают пермские преимущественно глинистые слабопроницаемые образования мощностью до 30—40 м. Наиболее молодые породы относятся к четвертичному аллювию, имеющему мощность не более 10—11 м. Возможно, между западной и восточной частями района проходит зона разлома.

Для изучения рельефа поверхности карбонатных толщ и оценки ее трещиноватости использованы методы ВЭЗ с $AB_{\max} = 500$ м и СЭП с разносами $AB = 80$ и 200 м. Площадь участка составляет около 2 км²; сеть наблюдений ВЭЗ — 200—300 × 20 м, СЭП — 80 × 10 м. Установлены значения электрических сопротивлений для пермских глин — 20—40 Ом·м, интенсивно трещиноватых известняков — 125—210 Ом·м, известняков средней и слаботрещиноватых — 200—1500 Ом·м. По ВЭЗ обнаружено резкое изменение глубин до известняков примерно там, где гидрогеологи наметили зону разломов. По электропрофилированию с большей детальностью здесь же зафиксированы зоны с пониженными сопротивлениями известняков (75 Ом·м). По-видимому, электроразведкой прослежена трещиноватая зона, пропитанная минеральной водой. К сожалению, непосредственно на участке геофизических исследований контрольные скважины не пробурены, однако общие геологические данные говорят о правильности заключения.

Геофизические работы в районе курорта Ключи явились одни из первых в стране, в это время для разведки месторождения минеральных вод использовалась электроразведка. Несмотря на некоторые недостатки (излишне густая сеть наблюдений при исследовании коренных пород, отказ от изучения рыхлых пород, в зоне которых идет разгрузка минеральных вод, ограниченный выбор методов геофизической разведки и др.), они в целом показали реальные возможности электроразведки при изучении месторождений минеральных вод.

В конце 40-х годов И. А. Комиссаров и А. Д. Давыдов [39] проводили поиски пресных подземных вод в одном из районов

Волго-Камского артезианского бассейна, где под рыхлой толщой четвертичных и верхнепермских пород мощностью 150—200 м залегают пермские карбонатно-галогенные образования — опорный электрический горизонт практически бесконечного сопротивления. Использован метод ВЭЗ с $AB_{\max}=2$ км по сети наблюдений $2 \times 0,5$ км; площадь исследований около 50 км^2 . Установлено, что на некоторых участках в пойме крупных рек происходит засоление пресных подземных вод за счет подтока снизу соленых вод. На этих участках сокращается мощность зоны пресных вод (до нескольких метров), увеличивается продольная электрическая проводимость S и в несколько раз уменьшается сопротивление рыхлой толщи. Таким образом, по геофизическим данным, наряду с обнаружением участков, где циркулируют пресные воды, выявлены зоны разгрузки высокоминерализованных вод.

В качестве примера использования геофизических методов при изучении месторождений описываемой подгруппы рассмотрим работы, проведенные в районе Старой Руссы в 1971—1975 гг. Главное их назначение заключалось в поисках и разведке пресных вод для центрального водоснабжения города и курорта. Одновременно выполнены исследования, связанные с изучением минеральных вод курорта (В. В. Селадынина, И. М. Кабакова, 1974 г.).

Изучаемый район входит в состав Ленинградского артезианского бассейна. Его разрез представлен девонскими карбонатными и терригенными отложениями, залегающими на более древних образованиях (табл. 3). В карбонатных породах девона отмечается трещиноватость юго-восточного направления. В додевонской толще и фундаменте по геофизическим данным установлены разломы северо-восточного и субширотного направлений. Естественные выходы на поверхность минеральных вод, по-видимому, приурочены к зоне пересечения указанных разломов [71]. Основным водоносным горизонтом района, используемым для хозяйственно-питьевого водоснабжения, является бургский. Водообильность его резко меняется по площади, что обусловлено изменением трещиноватости пород. Минерализация вод свинордско-псковского комплекса составляет 9—13 г/л, швентойско-старооскольского — 19—20 г/л. Воды обоих комплексов используются в лечебных целях. В изучаемом районе «купола» засоления отмечены в швентойско-старооскольском, свинордско-псковском комплексах и бургском горизонте. В последнем площадь засоления составляет около 10 км^2 и имеет изометрическую форму. Вблизи источников и фонтанирующих скважин установлены также зоны с солеными грунтовыми водами.

Участок геофизических исследований с юга примыкает к оз. Ильмень, площадь его 360 км^2 . Наземные геофизические работы сопровождались бурением и каротажем скважин. Главная

Таблица 3

Наименование и возраст водоносного (водоупорного) горизонта или комплекса	Литологический состав пород	Мощность горизонта или комплекса, м
Грунтовые воды четвертичных отложений Q_{III-IV}	Пески	0—8
Четвертичный водоупор Q_{III-IV}	Суглинки моренные	0—12
Воронежский водоносный горизонт D_3vt	Глины, пески	1—21
Бургский водоносный горизонт D_3br	Известняк	3—18
Ильменский водоупор D_3il	Глина	28—29
Свинордско-псковский водоносный комплекс D_3ps-sv	Известняк с редкими прослоями глины	40—60
Снетогорский водоупор, D_3sn	Алевролиты песчанистые	5—9
Швентойско-старооскольский водоносный комплекс, $D_{2-3} st-sv$	Пески	290—300

цель наблюдений заключалась в выявлении и оконтуривании зон интенсивной трещиноватости в известняках и уточнении границ распространения высокоминерализованных подземных вод. Для этого использовался метод ВЭЗ с $AB_{max}=1$ км. Профили ориентированы вкrest предполагаемого простираия зон трещиноватости. Расстояние между ними — 2—4 км, шаг наблюдений вдоль профилей — 0,5 км. Общий объем наблюдений — 302 точки ВЭЗ. По характеру такая съемка может быть отнесена к поисковой масштаба 1:100 000. Основное внимание при геофизических исследованиях уделено бургскому горизонту.

По каротажным диаграммам установлено, что известняки четко выделяются высокими сопротивлениями (в среднем 260—380 Ом·м) среди сравнительно низкоомных вмещающих пород; обнаруживается зависимость электрического сопротивления известняков от минерализации подземных вод и степени трещиноватости пород, так как с увеличением этих параметров сопротивление убывает. Большинство кривых ВЭЗ относится к типу K : $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, где сопротивление ρ_1 характеризует песчано-глинистые отложения, залегающие над бургским горизонтом,

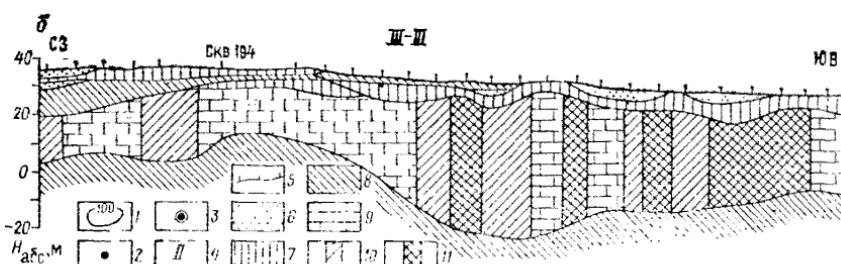
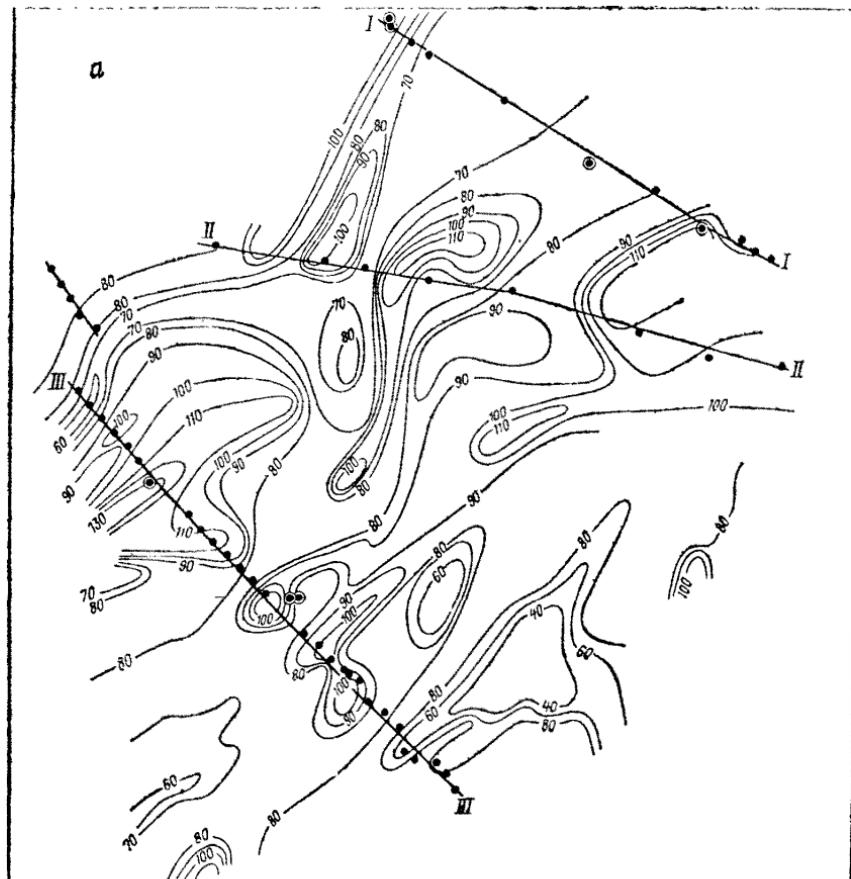


Рис. 5. Результаты электроразведочных работ при поисках и разведке пресных и минеральных вод в районе курорта «Старая Русса» (по данным И. М. Кабаковой и В. В. Селадиной, 1974 г.).

а — карта кажущихся электрических сопротивлений ρ_k известнякового горизонта; б — геоэлектрический разрез по профилю III-III:

1 — линия равных значений ρ_k , Ом·м (значения ρ_k сняты с кривых ВЭЗ в зоне максимума K); 2 — пункт ВЭЗ на карте; 3 — пункт параметрического ВЭЗ; 4 — номера профилей; 5 — пункт ВЭЗ на разрезе; геоэлектрические горизонты различного электрического сопротивления, Ом·м: 6 — от 100 до 500, 7 — от 15 до 50, 8 — от 30 до 100, 9 — от 150 до 400 (бургский горизонт); зоны аномального электрического сопротивления бургского горизонта: 10 — пониженного, 11 — наиболее низкого

ρ_2 — карбонатные породы бурегского горизонта, ρ_3 — ильменские водоупорные глины. Величина ρ_1 колеблется от 20 до 300 Ом·м, причем сопротивление 150—300 Ом·м характерно для песчаников, 20—60 — для глин; ρ_2 варьирует от 100 до 400 Ом·м; ρ_3 — сравнительно постоянно и примерно равно 40 Ом·м, поэтому ильменские водоупорные глины — надежный опорный электрический горизонт. На кривых ВЭЗ известняки бурегского горизонта могут фиксироваться тремя интервалами сопротивлений. Сравнительно низкие сопротивления характерны для высокой минерализации подземных вод, средние — для пресных при интенсивной трещиноватости пород, высокие — для слаботрещиноватых отложений с пресными водами.

Интерпретация кривых ВЭЗ свелась к построению геоэлектрических разрезов, карт сопротивления и т. п. (рис. 5). Наиболее эффективным оказался анализ величин значений $\rho_{\text{кmax}}$, отмеченных на кривых ВЭЗ в области их максимума. В районе г. Старая Русса выделяется зона низких значений $\rho_{\text{кmax}}$ — менее 50 Ом·м, которая фиксирует «купол» засоления. На рис. 5 отмечается еще один минимум $\rho_{\text{кmax}}$ в интервале 60—80 Ом·м, который в целом вытянут в северо-восточном направлении, пересекая всю изученную территорию. Здесь циркулируют слабоминерализованные воды, но породы отличаются высокой водообильностью. Остальная площадь характеризуется величиной $\rho_{\text{кmax}}$ более 100 Ом·м. В этой зоне также распространены пресные воды, однако водообильность пород слабая.

Проведенные работы оказались весьма результативными как в практическом, так и методическом отношении. Эффективность их, по-видимому, могла быть более высокой, если помимо ВЭЗ использовать также КМПВ. С его помощью можно более однозначно выделять зоны трещиноватости, даже сравнительно узкие.

При геофизических исследованиях месторождений второй подгруппы (когда очаги разгрузки явно не отражаются в геофизических полях) используются только структурные методы — ВЭЗ, КМПВ, реже гравиразведка. Принципиально методика их применения не отличается от структурных исследований месторождений первой подгруппы и имеет много общего с методикой изучения пластовых месторождений (см. ниже).

Месторождения, связанные с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие напорные горизонты. Они образуются в местах узколокализованных гидрогеологических «окон», по которым происходит разгрузка напорных минеральных вод глубоких горизонтов в вышележащие напорные, сверху перекрытые водоупорными толщами. Для этих месторождений характерно отсутствие в приповерхностной части разреза очагов разгрузки.

По имеющимся данным региональных геофизических и гидрогеологических исследований можно выявить зоны, к которым

приурочены месторождения изучаемого типа; это можно сделать, например, оконтурив обширную область разгрузки глубоких напорных минеральных вод в вышележащие артезианские горизонты. Гидрогеологические «окна» в данном случае могут быть связаны либо с выклиниванием глубокого водоупорного горизонта, либо с повышенной трещиноватостью карбонатно-хемогенных пород, также играющих роль водоупора, либо с крупной зоной разломов. Однако обнаружить такие месторождения лишь по готовым геофизическим материалам затруднительно.

В то же время специально организованные структурные геофизические исследования могут оказать помощь в обнаружении этих месторождений. Такая потребность возникает, когда извлечение воды с больших глубин (2000—3000 м) экономически нецелесообразно и нужно обнаружить зоны, в которых глубинные воды за счет перетока приближаются к дневной поверхности; здесь возможен их кантаж с помощью неглубоких скважин.

Основная задача геофизических поисков заключается в оконтуривании в пределах перспективной зоны, выявленной по региональным данным, гидрогеологических «окон». Она решается на основе структурных исследований, при которых разрез расчленяется на основные комплексы. Кроме того, прослеживаются зоны разломов и локальных структур, изучается характер фациально-литологических изменений пород и т. п. К задачам, решаемым уже на стадии предварительной разведки, относятся сравнительное определение водообильности толщи, в которую происходит переток минеральных вод, и общей минерализации подземных вод в ней, более полное исследование тектоники, детальное изучение приповерхностной части разреза и др.

При изучении разрезов, в которых существенно преобладают карбонатно-хемогенные породы, наиболее часто приходится сталкиваться со случаем, когда напорные высокоминерализованные воды глубоких горизонтов разгружаются в самый верхний горизонт, сложенный трещиноватыми карбонатными (или хемогенными) породами и перекрытыми сверху слабопроницаемыми песчано-глинистыми толщами. При такой ситуации на стадии поисков обычно можно ограничиться методом ВЭЗ.

При предварительной разведке в целях более четкого изучения водообильности карбонатных пород желательно иногда привлекать помимо ВЭЗ также ЭП, ВЭЗ-ВП, КВЭЗ и КМПВ. В табл. 4 приводятся сведения о методике геофизических исследований при изучении рассматриваемого подтипа месторождений минеральных вод.

Если разрез сложен исключительно терригенными породами, причем водоносные и водоупорные комплексы имеют значительную мощность и гидрогеологические «окна», по которым осуществляется гидравлическая связь между напорными горизонтами, выражены достаточно четко, при поисках и разведке можно ог-

раничиться лишь методом ВЭЗ (ДЗ). На поисковом этапе площадь исследований измеряется сотнями и первыми тысячами квадратных километров. Результативный масштаб съемок — 1 : 100 000 — 1 : 200 000. Расстояние между пунктами ВЭЗ вдоль профилей (маршрутов) — 1—2 км, а между профилями — в 2—4 раза больше. Глубинность исследований 200—600 м, реже более.

При предварительной разведке площадь исследуемых участков сокращается на порядок, а сеть наблюдений сгущается примерно вдвое; часть зондирований для изучения лишь верхней части разреза выполняется с меньшими разносами AB_{\max} . В наиболее сложных случаях (например, при тонкослоистом разрезе, который невозможно расчленить методом ВЭЗ) по отдельным профилям после проведения электроразведочных работ отрабатывается сейсморазведка КМПВ или МОВ. Иногда целесообразно привлекать гравиметрические высокоточные наблюдения.

Рассмотрим примеры использования геофизических методов. Прежде всего приведем на материалах мелкомасштабных съемок Московского артезианского бассейна возможности геофизических методов при региональном прогнозировании месторождений изучаемого типа.

В Московском бассейне

Таблица 4

Метод и основные показатели исследований	Стадии и глубина исследований, м		помехи	предварительная разведка
	20—100	100—400		
Результативный масштаб съемки	1 : 50 000	1 : 10000—1 : 25000	1 : 100 000	1 : 25 000
Площадь изучаемых участков, км ²	200—400	10—25	400—1000	20—100
Метод ВЭЗ				
AB_{\max} , м	• • • •	1000—2000	500—2000	2000—4000
сеть наблюдений, м	• • • •	500—1000×250—500	250—500×100—250	1000—2000×500—1000
Метод СЭП				
AB , м	• • • •	До 500—800	До 500—800	—
сеть наблюдений, м	• • • •	1000×50—100	250—500×25—50	—
Дополнительные методы				КМПВ, МОВ КВЭЗ

распространены минеральные воды как без специфических компонентов и свойств, так и йodo-бромные. По литолого-стратиграфическим и структурно-тектоническим признакам платформенный покров расчленяется на четыре основных комплекса отложений (снизу—вверх): нижний терригенный комплекс НТК ($R_f—O_1$); терригенно-карбонатный комплекс ТКК ($O_2—D_3f$); карбонатный комплекс КК ($C_1—P_2kz$); верхний терригенный комплекс ВТК ($P_2—Q$). Минеральные воды приурочены к девонским и более древним образованиям, а в наиболее погруженной части бассейна — ко всему комплексу КК и глубоким горизонтам ВТК.

Расчленение разреза на перечисленные комплексы может быть осуществлено с помощью геофизических методов. Так, поверхность кристаллического фундамента фиксируется магнито- и гравиразведкой, методами ДЗ и КМПВ. Вышележащие границы прослеживаются сейсморазведкой и отчасти электроразведкой. С помощью МОВ внутри ТКК и КК устанавливается серия границ, хорошо увязывающихся с залеганием глинистых и гипсонасных водоупоров. Тем более что исчезновение отражений обычно связано с выклиниванием или фациальным изменением пород, слагающих водоупорные толщи. По величине электрической проводимости пород НТК можно судить о насыщении их высокоминерализованными водами. Для Московского бассейна установлено, что тектонические нарушения в фундаменте и покрове, как правило, сопровождаются резко усиленной эндогенной трещиноватостью пород. Зоны разломов, флексуры и антиклинальные структуры являются площадями, в пределах которых может осуществляться интенсивный переток минеральных вод глубоких горизонтов в вышележащие. Интенсивность тектонических нарушений затухает вверх по вертикали. Отмечается одновременно достаточно четкая унаследованность плана структур, так часто по поверхности фундамента фиксируется зона разломов со значительным перемещением блоков, выше по разрезу она может перейти во флексуру, затем — в пологую складку, а в самых поверхностных горизонтах разреза, где вообще не обнаруживается заметных нарушений в залегании отложений, отмечается увеличенная трещиноватость массивных пород. На рис. 6 показана гипсометрия поверхности кристаллического фундамента и глин верейского горизонта, приуроченного к карбонатному комплексу¹. По поверхности фундамента наблюдается весьма контрастная тектоника. Рельеф поверхности верейского горизонта в общих чертах соответствует основным элементам, отмеченным на карте, характеризующей кристалли-

¹ Первая поверхность построена по геофизическим данным, вторая — по данным бурения скважин. Однако поскольку поверхность верейских глин является хорошо прослеживающимся в районе отражающим горизонтом, ее гипсометрию можно изучать и по геофизическим материалам.

ческий фундамент. Особенно четко повторяются флексурио-разрывные зоны, проходящие в широтном направлении в верховьях р. Мологи. Указанные зоны весьма благоприятны для разбуривания: в верхних горизонтах КК можно обнаружить обильные пресные воды, в более глубоких — минеральные различного состава.

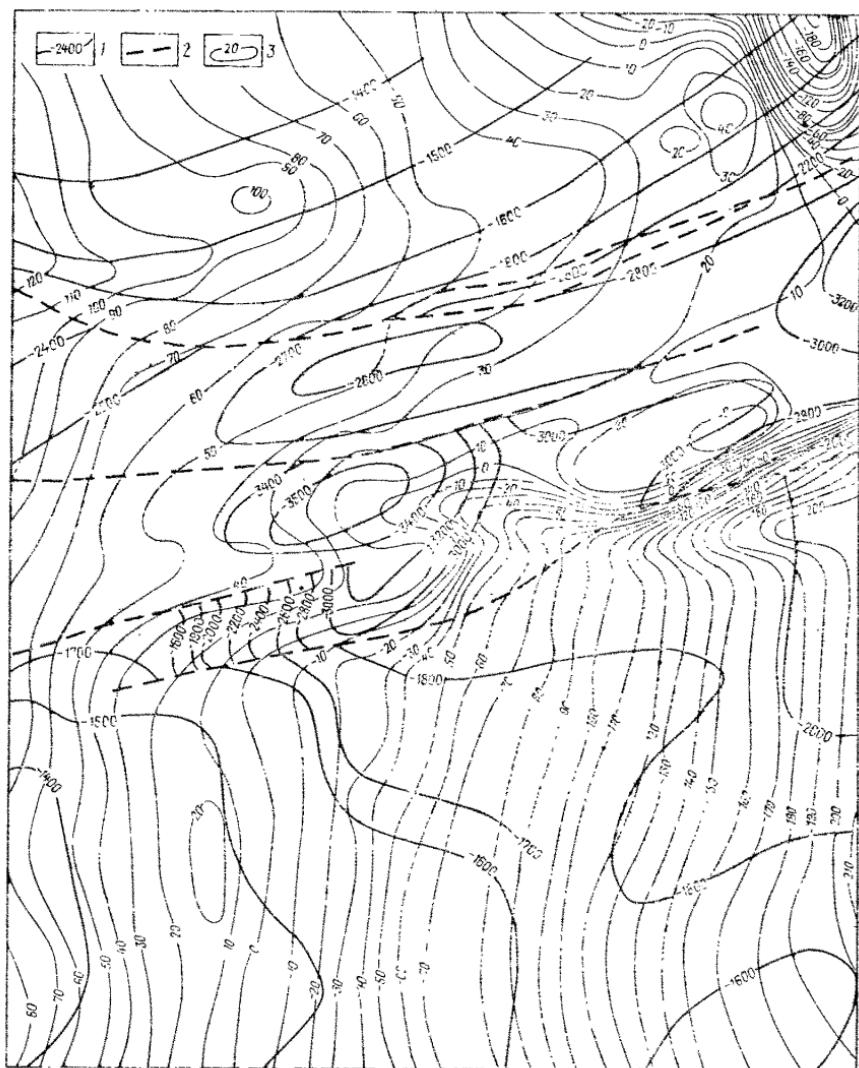


Рис. 6. Структурно-тектоническая карта юго-западной части Московского бассейна (по материалам ГУЦР и ЦГТ МГ РСФСР).

1 — изогипсы поверхности кристаллического фундамента, м; 2 — зоны разломов, охватывающих фундамент и нижнюю часть осадочного покрова; 3 — изогипсы поверхности верейских глин (C_2vgr), м

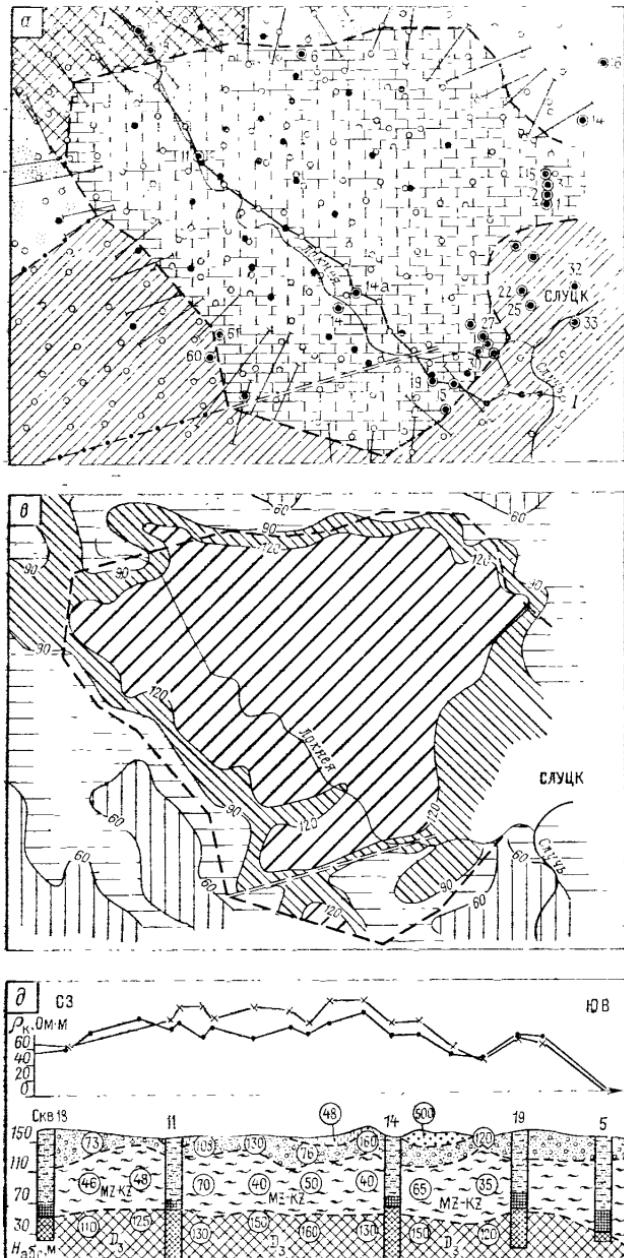
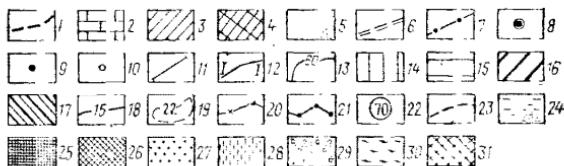
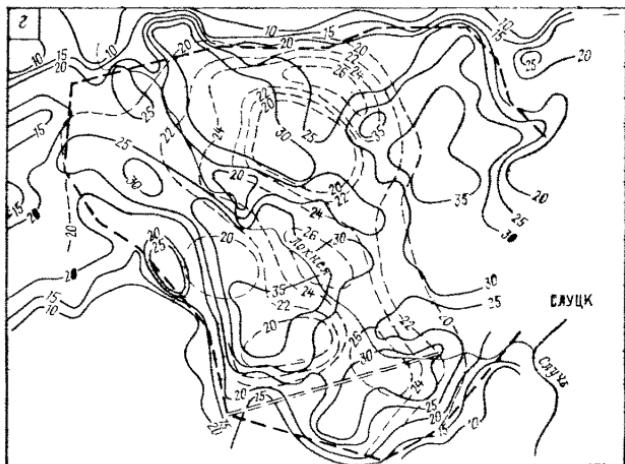
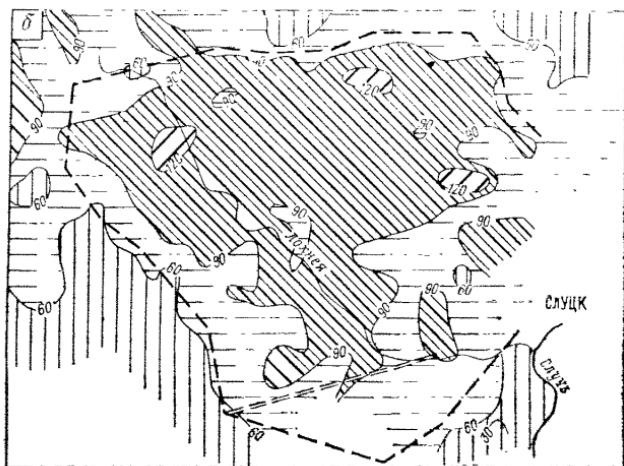


Рис. 7. Результаты геофизической разведки подземных вод в районе г. Слуцка (по В. И. Бобрикевичу, 1971 г.).

а — геологическое картирование поверхности домезозойских пород; б — карта кажущихся электрических сопротивлений ρ_k по данным ВЭЗ и ЭП; в — карта удельных электрических сопротивлений ρ домезозойских пород; г — карты кажущейся поляризации η_k по данным ВП и углов наклона конечной ветви α кривых ВЭЗ; д — геоэлектрический разрез I—I;



1 — граница Слуцкого блока; состав домезозойских пород; 2 — перекрывание терригенных и карбонатных отложений, 4 — песчаники, 5 — песчано-глинистые отложения; зона крупного разлома, по которому поступает вверх минерализованная вода: 6 — в пределах блока, 7 — за его пределами; 8 — гидрогеологические скважины; 9 — пункты ВЭЗ-ВИ; 10 — пункты ВЭЗ; 11 — профили ЭП; 12 — линии геоэлектрического разреза; 13 — изомоны, Ом.м.; зоны различных электрических сопротивлений в Ом.м.; 14 — от 30 до 60, 15 — от 60 до 90, 16 — от 90 до 120, 17 — свыше 120; 18 — линии равных значений α в градусах; 19 — линии равных значений η_k в %; графики ρ_k при AB в м: 20—650, 21—150; 22 — значения удельного электрического сопротивления горизонтов в отдельных пунктах в Ом.м.; 23 — границы геоэлектрических горизонтов на разрезе; литология пород по скважинам: 24 — песчано-глинистые отложения, 25 — мелоподобные породы, 26 — домезозойский комплекс; геоэлектрические горизонты на разрезах с сопротивлением в Ом.м: 27 — от 250 до 600, 28 — от 30 до 70 (в верхней части разреза), 29 — от 70 до 150, 30 — от 30 до 70 (в средней части разреза), 31 — от 80 до 150

В качестве примера приведем геофизические исследования, выполненные на этапе поисково-разведочных работ в 1970 г. под руководством В. И. Бобрикова. Изучаемый район площадью в 280 км² прилегает с запада к г. Слуцку (рис. 7) и относится к переходной зоне от Белорусского кристаллического массива к Припятской впадине. Поверхность домезозойских пород залегает на глубине 50—80 м. Наиболее водообильными являются верхнедевонские известняки, распространенные в пределах так называемого Слуцкого тектонического блока. С помощью геофизических исследований необходимо было уточнить контур развития известняков девона (D_3), определить глубины их залегания и выделить трещиноватые наиболее водообильные зоны. Попутно изучались высокоминерализованные воды девонских отложений. Масштаб результативных построений — 1 : 50 000. В качестве основных использовались методы ВЭЗ и СЭП. Общая стоимость работ 36,9 тыс. руб.

Метод ВЭЗ применялся с разносами AB_{\max} до 1—2 км по сети 1×1 км. На кривых ВЭЗ выделено до пяти геоэлектрических горизонтов; из них верхние четыре характеризуют мезозойско-кайнозойские отложения, а наиболее глубокий — пятый — известняки девона, имеющие сопротивление 100—200 Ом·м, или терригенные породы того же возраста (80—100 Ом·м). Этот горизонт фигурирует в качестве опорного, особенно в пределах блока известняков. По величине кажущихся и удельных сопротивлений, характеризующих опорный электрический горизонт, оконтурен блок известняков D_3 . По резкому уменьшению сопротивления опорного горизонта (ρ_5) и наличию узкой, вытянутой аномалии ρ_k в южной части блока намечена зона разлома, по которому поступают снизу высокоминерализованные воды. Центральная часть блока отличается максимальными сопротивлениями (более 150 Ом·м).

Электропрофилирование СЭП с разносами $AB=900$ м ставилось с целью уточнения контуров блока карбонатных пород. Расстояния между профилями 1000—2000 м, шаг наблюдений 50—100 м. Для «блоковой» части территории сопротивление ρ_k , полученное с помощью СЭП, составляет 100—120 Ом·м, для «заблоковой» — 40—60 Ом·м. Комплекс, состоящий из СЭП, ВЭЗ и данных бурения, оказался достаточно эффективным.

Рассмотренный пример указывает, что при поступлении по зонам разломов и интенсивной трещиноватости высокоминерализованных вод сопротивление даже массивных пород резко снижается и такие зоны при сравнительно небольшой мощности рыхлых отложений хорошо трассируются различными методами электроразведки.

Месторождения пластового типа. Для этих месторождений характерна большая площадь распространения однотипных минеральных вод при достаточно однородных гидрологических характеристиках. При поисках и разведке таких месторождений

проводить наземные геофизические исследования в большинстве случаев не следует. Однако целесообразно использовать для выделения перспективных участков и проектирования глубоких скважин результаты геофизических обобщений готовых материалов съемок масштабом 1:500 000 — 1:1 000 000. Изучение рассматриваемых месторождений производится только структурными геофизическими методами и имеет много общего с поисками и разведкой различного рода пластовых месторождений твердых и жидких полезных ископаемых.

Первоначально рассмотрим особенности исследований в условиях бассейнов, платформенный чехол которых сложен терригенными породами. При прогнозировании месторождений минеральных вод в таких условиях с помощью готовых геофизических материалов необходимо: выделить структуры, представляющие потенциальный интерес для обнаружения минеральных вод; расчленить разрез на основные водоносные и водоупорные комплексы; приближенно оценить фильтрационные свойства региональных водоупоров; определить величину общей минерализации подземных вод водоносных комплексов; рассчитать температуру минеральных вод на глубинах, не вскрытых буровыми скважинами. При благоприятных условиях оценивается водопроводимость мощных водоносных горизонтов, в которых циркулируют слабоминерализованные воды.

В качестве удачного примера обработки готовых геофизических материалов приведем исследования по Сырдарьинскому артезианскому бассейну, проведенные в 1967—1970 гг. ВСЕГИНГЕО совместно с Гидрогеологическим управлением Министерства геологии Казахской ССР [46]. Этими работами установлено, что на большей части Сырдарьинского бассейна в глубоких горизонтах меловых отложений циркулируют минеральные воды без специфических компонентов и свойств, в западной и восточной частях бассейна можно вскрыть термальные и высокоминерализованные, а в непосредственной близости от Аральского моря — термальные йодо-бромные воды. Вся обработка геофизического материала обошлась в 30 тыс. руб. Масштаб результативных карт — 1:500 000 — 1:1 000 000, площадь исследований — более 200 000 км². При этом прогнозировались не только термальные и минеральные, но и пресные воды.

В отдельных случаях все же возникает необходимость в специальной постановке полевых работ. Такая ситуация иногда складывается в красных частях артезианских бассейнов при отсутствии мелкомасштабных геофизических наблюдений. Задачи геофизических полевых работ ограничиваются расчленением разреза на основные водоносные и водоупорные комплексы и уточнением тектоники района. По характеру изменения электрического сопротивления водоносных толщ приближенно проводится граница между областями различной минерализации напорных вод.

Геофизические работы осуществляются главным образом на поисковой стадии. Основным служит метод ВЭЗ или ДЗ. В зависимости от однородности условий и глубины исследований резльтативный масштаб геофизических построений варьирует от 1 : 200 000 до 1 : 500 000. Площадь исследований значительная — сотни и тысячи квадратных километров. Сеть наблюдений обычно редкая (2—10) × (1—5) км. Глубина исследований — от нескольких сотен до 500—1000 м. При недостаточно благоприятных геоэлектрических условиях целесообразна дополнительная отработка нескольких сейсмических профилей. Как электро-, так и сейсморазведкой во всех возможных случаях следует изучать первый сверху маркирующий горизонт, хорошо отражающий глубинную тектонику. Обычно четкая унаследованность структур допускает это. Иногда целесообразно использовать гравиразведку в комплексе с электроразведкой для оконтуривания поднятий и других структур.

При исследовании месторождений, в разрезе которых преобладают карбонатно-хемогенные породы, также в большинстве случаев могут быть использованы готовые геофизические материалы. Наличие мощных сульфатно-галогенных пород, однако, снижает эффективность геофизических исследований, поскольку эти породы могут служить серьезным экраном для электрического и сейсмического полей.

Специальное проведение полевых геофизических работ для выявления месторождений минеральных вод пластового типа осуществляется редко и только на стадии поисков. Задача геофизических работ чаще всего сводится к определению мощности рыхлых отложений, перекрывающих карбонатно-хемогенные породы. Для этого можно использовать ВЭЗ. Резльтативный масштаб исследований 1 : 100 000 — 1 : 200 000. Съемка должна носить равномерный площадной характер. Применение метода ВЭЗ позволяет в отдельных случаях дать заключение о характере водообильности карбонатно-галогенных пород. Значительно реже привлекаются высокоточная грави- и сейсморазведка.

Скважинные геофизические методы

Для месторождений платформенных областей — водонапорных пластовых систем характерны поровые и трещинно-поровые коллекторы осадочного комплекса: пески, песчаники различной степени глинистости и карбонатности, мергели, известняки и доломиты.

Водоносные горизонты, залегающие на глубинах от десятков метров до нескольких километров, характеризуются сложным строением водовмещающих пород, значительными пластовыми давлениями и температурами, наличием в водах растворенного газа. Это определяет выбор комплекса скважинных геофизических исследований и методики интерпретации материала.

В общем случае комплекс скважинных геофизических исследований включает стандартный каротаж двумя зондами различного радиуса исследования и запись кривой ПС, БКЗ, ГК, НГК (выполняется реже), кавернометрию, термометрию в ее стандартном исполнении, инклинометрию. Резистивиметрия, термометрия и расходометрия для изучения притоков вод производятся в скважинах средних глубин при удовлетворительном состоянии их стенок перед проведением каротажа.

Задача изучения пространственного распространения коллекторов методически решается построением корреляционных геофизических схем по комплексу кривых, полученных для скважин изучаемого месторождения или (если скважины одиночные) с привлечением геофизических кривых по скважинам различного целевого назначения данного или сопредельных районов со сходным геологическим строением. Широко используются фоновые геологические, гидрогеологические, геохимические и другие материалы. Корреляционные сопоставления для месторождений пластового типа со спокойной тектоникой могут быть выполнены на основе электрокаротажных и радиометрических работ.

При изучении платформенных месторождений, приуроченных к зонам разгрузки напорных вод в вышележащие горизонты и бассейны грунтовых вод, когда очаги разгрузки определяются возможными выклиниваниями водоупоров и водоносных толщ, эрозионными размывами, фаunalным замещением, тектоническими нарушениями, комплекс исследований помимо стандартных электрокаротажных и радиометрических работ целесообразно дополнить резистивиметрическими и термометрическими исследованиями. Поисковыми критериями водовыводящих путей служит различие в температурных характеристиках и минерализации вод в гидрогеологически ослабленных зонах и вмещающих породах.

Задачи количественной интерпретации в условиях ограниченного комплекса геофизических исследований, нередко проводящихся в скважинах платформенных месторождений минеральных вод, сводятся к определению эффективной мощности, пористости и глинистости коллекторов.

Коллекторы осадочного комплекса с межзерновым (песчаники и песчано-глинистые породы) и трещинно-кавернозным (карбонаты) типами пористости изучены сейчас неодинаково. Песчаные коллекторы — достаточно подробно. Полученные данные интерпретируются с использованием методик нефтегазовой геофизики [23 и др.]. При наличии в коллекторах с межзерновой пористостью рассеянного глинистого материала или тонких его прослоев для интерпретации геофизических кривых необходимо выбрать достаточно обоснованный метод учета глинистости. Это составляет одну из важнейших особенностей изучения коллекторов минеральных вод методами геофизики, особенно при насы-

щении их пресными и слабоминерализованными водами, когда значительную роль в формировании порового пространства играют граничные слои связанной воды (адсорбционный и диффузионный слой двойного электрического слоя) [14, 23, 61].

Эффективная пористость и проницаемость коллектора в значительной степени зависят от присутствия в порах широко развитого диффузионного слоя, вызывающего набухание глинистого материала. Удельное сопротивление породы определяется соотношением в порах породы объемов свободного раствора и двойного электрического слоя и искажается из-за поверхностной проводимости последнего, причем тем больше, чем выше глинистость разреза и ниже минерализация пластовых вод. С этой точки зрения надежность количественной интерпретации электрокаротажных кривых зависит от того, насколько полно и точно будут отражены природные условия в расчетных данных и, в частности, содержание глинистого материала и связанных с ним эффектов поверхностной проводимости.

Основными и наиболее перспективными методами при изучении песчано-глинистых коллекторов являются электро- и гамма-каротаж, которые, с одной стороны, дают информацию о пористости коллекторов (КС) и позволяют контролировать присутствие в них глинистого материала (ГК), а с другой, носят массивный характер и замеряются при бурении скважин различного целевого назначения повсеместно. Это приводит к возможности их комплексного анализа в пределах изучаемого региона для сравнительной оценки фильтрационной характеристики разреза.

Особенности изучения песчано-глинистых коллекторов состоят в следующем. На стадии качественной интерпретации изучаются литология разреза, мощность коллекторов, форма кривых КС и ПС. Истинное сопротивление пород оценивается с поправкой на поверхностную проводимость присутствующего в породе глинистого материала по известным методикам [23].

Общая и эффективная мощности водоносного горизонта оцениваются по данным электрокаротажа, по кривой ПС, материалам радиоактивного каротажа (ГК, НГК); суммарная мощность глинистых пропластков исключается из общей мощности пласта-коллектора.

Пористость породы рассчитывается по данным электрокаротажа с поправкой на глинистость с помощью известных палеток и номограмм [23]. Широко используется соотношение $P_{\pi} = f(\kappa_{\pi})$, которое для песчаных пластов, не содержащих глинистого материала, принимает следующий вид:

$$P_{\pi} = k_{\pi}^{-2}.$$

При этом величина относительного сопротивления

$$P_{\pi} = \rho_{\pi} / \rho_{\text{пл в}},$$

где ρ_p и $\rho_{p,l}$ в соответственно удельное сопротивление породы и пластовой воды. Показатель степени учитывает присутствие глинистого материала в породе и уменьшается соответственно с ростом его содержания.

Использование нейтронного каротажа для количественных расчетов исключается, так как этим методом оценивается общее водосодержание породы, включая свободную и связанную воду, а не эффективная пористость.

Для достижения оперативности обработки геофизического материала при оценке сравнительной фильтрационной неоднородности разреза следует применять данные гамма-метода. Глинистость коллектора является одним из главных факторов, определяющих его фильтрационные свойства. В связи с этим кривые ГК, отражающие в первом приближении распределение глинистых фракций в разрезе, могут быть использованы не только при расчленении разреза по степени глинистости, но и для оценки эффективных мощностей и возможной водообильности пород. Физическая основа использования метода — наличие эталонной зависимости радиоактивных горных пород от суммарного содержания в них пелитовой и растворимой фракций [23]. Выявленные для различных районов страны корреляционные связи можно использовать для расчета глинистости коллекторов с последующей сравнительной оценкой их фильтрационных свойств. Это возможно, если предварительно для разреза была установлена корреляционная зависимость между коэффициентом фильтрации (по исследованиям гидрогеологических скважин) и содержанием глинистого материала (по данным гамма-каротажа)

$$k_{\text{пр}}(k_{\Phi}) = f(C_{\text{гл}}).$$

Предпосылкой существования приведенных выше соотношений является постоянство минералогического состава глин и их удельной активности, а также преобладание кварца в песчаной фракции и отсутствие в ней глауконитовых и других радиоактивных примесей.

Непосредственно фильтрационные неоднородности разреза с пересчетом на гидрогеологические параметры можно определить с помощью резистивиметрии и расходометрии [7, 21].

При изучении трещиноватых коллекторов (карбонатов со сложным типом пористости) кривые сопротивления не имеют каких-либо существенных особенностей, за исключением иззубренности и иногда беспорядочного отклонения. Кривая ПС в целом мало выразительна, амплитуда ее отклонения редко достигает статического значения; характерны многочисленные выбросы (пики) на кривой, создаваемые, вероятно, фильтрационными потенциалами в трещинах или кавернах. Часто отклонения ПС совпадают с минимальными значениями сопротивления на тех же глубинах.

На кривых сопротивления, записанных микроустановками, наблюдается большое число отклонений в сторону низких значений; это, по-видимому, связано с тем, что удельное сопротивление в кавернах определяется буровым раствором. Аномалии на кривой ПС обычно совпадают по глубине с отклонениями на кривых КС. В сложных условиях трещиновато-кавернозного разреза, когда эффективность геофизических исследований низ-

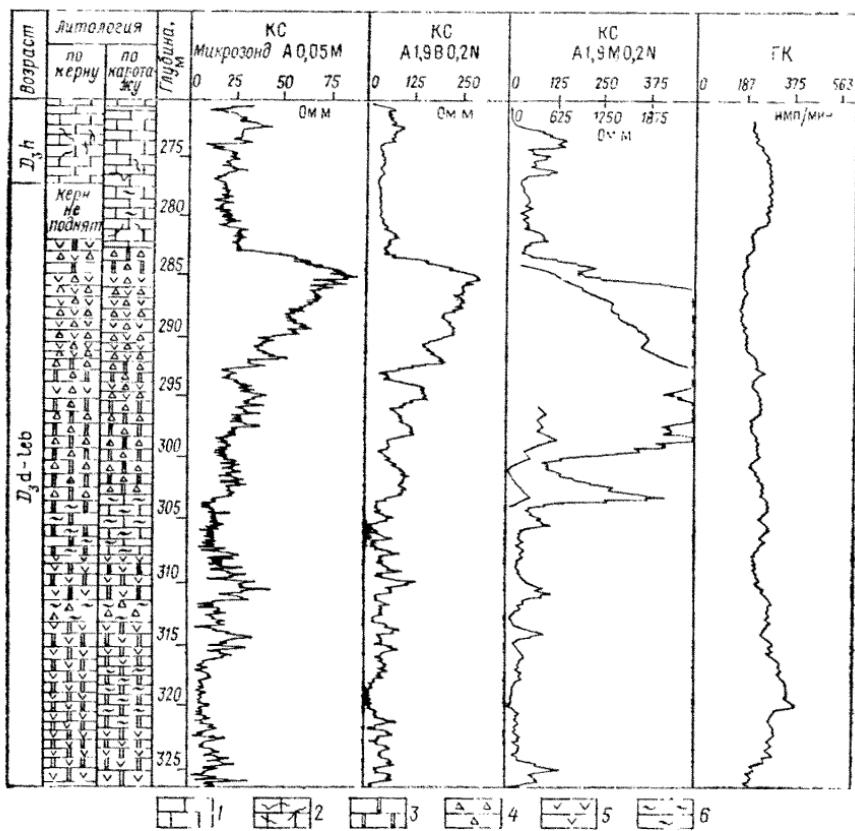


Рис. 8. Комплекс геофизических кривых для карбонатного разреза по участку Дорохово, Московская область (по Н. А. Огильви).

1 — известняк плотный; 2 — известняк трещиноватый; 3 — доломит; 4 — ангидрит; 5 — гипс; 6 — углисто-глинистые сланцы

ка, в нефтегазовой геофизике применяются определенные методические приемы (временные замеры сопротивления, метод двух растворов, комплексирование КС и НГК) и широко используются прямые методы изучения разреза (резистивиметрия, расходометрия) [7, 21]. При этом в основу количественной оценки трещинных коллекторов положено изучение параметров приле-

гающей к скважине зоны пласта (зоны проникновения бурового раствора), изменяющихся на разных стадиях изучения скважины после бурения вследствие проникновения бурового раствора в пласт. В гидрогеологических скважинах различного назначения такой расширенный комплекс исследований проводится редко. Обычно ограничиваются использованием стандартных электрометрических методов (КС, ПС), гамма-каротажем, резистивометрией, кавернометрией (рис. 8).

IV. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ПРЕДГОРНЫХ И МЕЖГОРНЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ И СКЛОНОВ

Полевые геофизические методы

Структурно-гидрогеологическая характеристика и приемы геофизических исследований рассматриваемых месторождений и месторождений артезианских бассейнов платформ имеют много общего, что связано преимущественно с пластовым характером залегания проницаемых пород. В этой группе можно выделить те же типы месторождений (см. табл. 2). Но в то же время для месторождений предгорных и межгорных бассейнов отмечается большая сложность. Это накладывает определенные особенности на методику геофизических исследований. Площадь поисковых и разведочных работ при изучении месторождений предгорных и межгорных бассейнов сокращается, а сеть наблюдений применяется более густой, результативный масштаб исследований становится крупнее. Наличие в некоторых бассейнах магматических пород среди отложений покрова и местами неглубокое залегание складчатого основания (фундамента) позволяет включить в комплекс геофизических методов также магниторазведку. Заметное влияние на методику геофизических работ оказывает глубина исследований, которая для различных месторождений варьирует в самых широких пределах.

Месторождения минеральных грунтовых вод. Эти месторождения по сравнению с остальными типами рассматриваемой группы, как правило, имеют небольшую практическую ценность, причем методика их изучения мало отличается от той, которая применяется при изучении аналогичных месторождений в платформенных условиях.

В качестве примера рассмотрим геофизические исследования, проведенные под руководством А. Н. Огильви в Цхалтубо [59]. Здесь известны термальные (32—35°C) слабоминерализованные азотные воды с небольшим содержанием радона (10—50 эман). А. Н. Огильви следующим образом объясняет происхождение радоновых цхалтубских вод: «По трещинам разлома

с больших глубин из юрских пород поднимается основная струя минеральных вод. Попадая в юрские отложения, выполняющие долину реки Цхалтубо, минеральные воды в некоторых местах сильно обогащаются эманацией радона за счет радиоактивных песков, залегающих в виде отдельных линз среди сравнительно мало активных песков». А. Н. Огильви в 30-х годах провел здесь дозороведку, которая заключалась в определении содержания радона в мелких скважинах. В центре четко выявленной аномалии пробурены более глубокие скважины, давшие интенсивный приток минеральных вод.

Месторождения, приуроченные к зонам разгрузки напорных потоков в бассейны грунтовых вод. Основной задачей геофизических методов при изучении таких месторождений на поисковой стадии является обнаружение и оконтуривание участков, где происходит переток минеральных вод из напорного горизонта в безнапорный. Переток осуществляется там, где имеются гидрогеологические «окна», которые можно выявить прежде всего на базе структурно-фациального анализа или в результате изучения зоны грунтовых вод на участке внедрения в них минеральных. Анализ начнем с наиболее простого варианта, когда требуются малоглубинные исследования.

Интенсивная разгрузка минеральных напорных вод в грунтовые способствует повышению минерализации (т. е. снижению электрического сопротивления), а иногда температуры и радиоактивности последних. Это создает хорошо локализуемые аномалии, фиксируемые методами ВЭЗ и ЭП, термометрией и радиометрией в неглубоких скважинах и шурфах, вскрывающих грунтовые воды. При наличии трещиноватых пород (известняков, мергелей) положительные результаты могут дать методы ВЭЗ и особенно КВЭЗ, позволяющие локализовать трещиноватую зону. При интенсивной фильтрации напорных вод в песчано-глинистые грунты иногда удается обнаружить аномалии ЕП. Если имеется достаточное количество естественных и искусственных водоемов, целесообразно провести в них резистивиметрические и термометрические наблюдения.

При проведении малоглубинных исследований площадь поисковых работ обычно невелика, она измеряется единицами и десятками квадратных километров. Линейный характер зон разгрузок заставляет принимать соответствующую конфигурацию поисковой площади. При однородных геолого-гидрогеологических условиях поисковые работы можно вести с построением результативных карт в масштабе 1:25 000 — 1:50 000, в более сложных — 1:5 000 — 1:10 000, с расположением профилей соответственно через 250—500 и 50—100 м. Расстояния между профилиями, естественно, определяются размерами очагов разгрузки. Из тех же соображений шаг наблюдений вдоль профилей может варьировать от 5—10 до 25—50. Основным методом при описываемых исследованиях является ЭП, сочетаемое с более

редкой сетью ВЭЗ и КВЭЗ, задаваемых на аномальных зонах. Разности AB при ЭП обычно не превышают первых сотен метров, а ВЭЗ — 500—1000 м. При соответствующих физических предпосылках по электрическим профилям на более интересных участках проводятся термометрические, радиометрические наблюдения, а также наблюдения по методу естественных потенциалов.

На стадии предварительной разведки главная задача геофизических методов заключается в обнаружении основного водовыводящего канала с тем, чтобы можно было правильно заложить разведочные скважины и вскрыть минеральные воды в этом канале (до смешивания их с грунтовыми). Дополнительно требуется: изучить строение верхней части разреза, определив мощность и литологический состав рыхлых отложений, перекрывающих коренные образования; установить в зоне очага разгрузки скорость и направление движения, а также уровень грунтовых вод; изучить глубинную тектонику района месторождения для выявления условий формирования минеральных вод. Последняя задача решается обычно методами структурной разведки и рассматривается при анализе второго варианта исследований. При предварительной разведке площадь исследований сокращается до нескольких квадратных километров. Результативный масштаб исследований 1:1000 — 1:10 000. Соответственно сеть наблюдений сгущается в 2—4 раза. Помимо методов, рекомендуемых при поисках, могут привлекаться инженерная сейсморазведка для установления уровня грунтовых вод и расчленения разреза в самой его верхней части, а также метод заряженного тела при определении направления и скорости грунтового потока.

В качестве удачных примеров применения геофизики при малой глубине разведки приведем исследования в районе курортов Кавказа, выполненные в 20-х — 30-х годах под руководством А. Н. Огильви при участии В. О. Урысона, осуществлявшего электроразведочные работы. Первоначально рассмотрим исследования в районе Мацесты.

Мацестинское месторождение минеральных вод приурочено к Сочи-Адлерской депрессии и одноименному артезианскому бассейну. Во внутренней части артезианского бассейна имеется серия брахантклинальных складок, в ядрах которых обнажается карбонатная толща. К последней приурочены сероводородные термальные воды (27°C и выше), отличающиеся значительной минерализацией (11 г/л и более) [53, 57]. На участке геофизических исследований, выполненных на стадии разведки, минеральная вода разгружается по серии сбросовых трещин, которые скрыты аллювиальными отложениями р. Мацеста (рис. 9). На основании общих геологических данных предполагалось, что тектонические нарушения имеют северо-западное направление. А. Н. Огильви на участке площадью 0,5 га по

многочисленным шурфам и неглубоким скважинам (глубиной до 2—4 м) провел детальную термометрическую съемку (в масштабе 1:500) и построил карту термоизоклий, т. е. аномальных температур. «Термоизоклины, — пишет А. Н. Огильви [57], — наметили трещину совершенно с другим направлением. Шурф и раскопки, сделанные на коренном склоне долины, вполне это подтвердили. В дальнейшем были проведены наклонные буро-

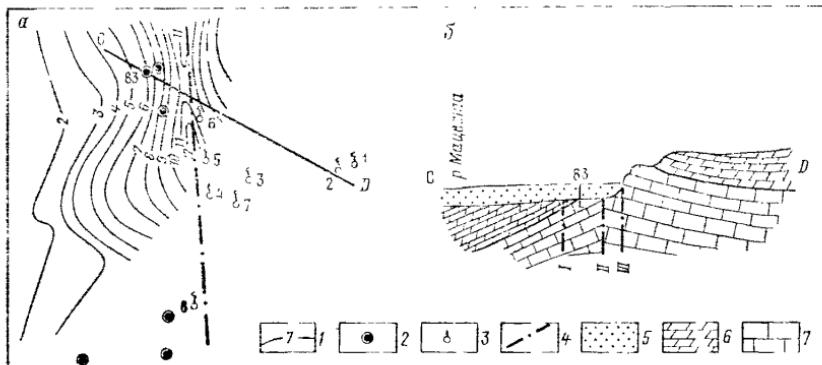


Рис. 9. Результаты термопроспектирования в районе Мацестинских минеральных источников (по А. Н. Огильви, 1931 г.).

а — карта термоизоклий: б — геологический разрез по линии CD; 1 — термоизоклины, °C; 2 — скважины на карте; 3 — источники минеральных вод и их номера; 4 — трещины разрыва (I—III); 5 — речные отложения; 6 — мергели K_2 ; 7 — известняки K_1 .

вые скважины, которые пересекли трещину и определили ее направление, вполне совпадающее с тем, которое было намечено термоизоклиями. Из трех трещин изоклины наметили только одну — среднюю. Крайние не получили соответственного отражения. Одна — так как она под наносами зажата в мягких глинистых мергелях, не дающих зияющих трещин. Другая — в силу того, что вода, циркулирующая по ней, имеет меньшую минерализацию и температуру сравнительно с водой, выходящей из второй трещины на этом участке.

В 1934—1935 гг. на этом же участке проведены электроразведочные работы. Проведено ЭП с $AB=200$ м по густой сети наблюдений. Для выяснения общей структуры участка выполнены ВЭЗ с разносами AB_{\max} до 1—2 км при расстояниях между пунктами наблюдений 200 м. Результаты электроразведки подтвердили выводы, сделанные ранее на основе термометрических замеров.

Другим примером служат поисковые электроразведочные работы 1936—1937 гг. вблизи Кисловодска в долине р. Березовки. Здесь требовалось обнаружить в толще аллювиальных и делювиальных отложений участки низкого сопротивления, создаваемые выходами напорных минеральных вод из трещин мергелей

палеогена и известняков верхнего мела, залегающих под наносами. Использовались методы ВЭЗ и ЭП с малыми разносами. Метод ВЭЗ служил для определения мощности наносов, ЭП — для оконтуривания низкоомных зон. Результаты электроразведки подтверждены бурением, обнаружены новые выходы минеральных вод.

В тех случаях, когда очаги разгрузки подземных вод проявляются недостаточно четко или малоглубинные работы не могут разрешить всех поставленных задач на этапе разведки, приходится идти по второму пути исследований, основанному на глубинном изучении тектоники, либо одновременно использовать оба варианта разведки.

На поисковом этапе структурные исследования заключаются в обнаружении антиклинальных поднятий, осложняющих их зон разломов, и расчленении разреза на водоносные и водоупорные толщи. Выбор поискового участка в таких условиях производится, как правило, на основе анализа региональных геофизических построений; при этом в одних случаях достаточно знать строение осадочного покрова, в других — необходимо характеризовать тектонику складчатого основания и более глубоких горизонтов земной коры (например, при исследовании термальных, углекислых и радоновых вод). Наиболее просто решить задачу можно, когда минеральные воды приурочены к мощным горизонтам карбонатных пород, перекрытых терригенной толщей. В таких условиях удается иногда ограничиваться методом ВЭЗ в комплексе с сейсморазведкой, выполняемой в небольшом объеме. При терригенном составе осадочного покрова, имеющего сравнительно небольшую мощность, можно также часто обойтись лишь методом ВЭЗ. Если же в геоэлектрическом разрезе нет четких опорных горизонтов, то необходимо дополнительно привлекать гравиметрию или сейсморазведку.

При наличии в разрезе магматических пород (в виде пластовых залежей, жил, даек и т. п.) целесообразно использовать магниторазведку, позволяющую оконтурить в плане эти тела и выяснить их наклон и глубинное распространение. Гидрогеологическая роль магматических тел весьма значительна: они могут в одних случаях служить водовыводящими каналами, в других — барьерами, препятствующими движению подземных вод. Наличие магматических пород в разрезе осадочных образований резко осложняет проведение сейсморазведочных работ. В указанных условиях поэтому наиболее часто используют магниторазведку в комплексе с электроразведкой, иногда привлекая гравиразведку.

Поисковые структурные исследования в зависимости от размеров изучаемых объектов и сложности гидрогеолого-геофизических условий должны обеспечить результиативный масштаб исследований 1 : 25 000 — 1 : 100 000. Площадь поисковых участков измеряется десятками — первыми сотнями квадратных

километров. Расстояние между профилями составляет 250–1000 м, иногда больше. По отдельным профилям осуществляется сейсморазведка. Шаг наблюдений по методу ВЭЗ варьирует от 100 до 500 м, по магнито- и гравиразведке — 50–200 м. Последние целесообразно выполнять так, чтобы можно было по их данным построить достаточно точные карты с введением всех необходимых редукций.

Во многих случаях наземные геофизические исследования на месторождениях заканчиваются описанными выше поисковыми работами. Иногда возникает необходимость их применения на стадии предварительной разведки. Главное значение этой стадии заключается в более детальном решении задач структурного направления. Часто требуется уточнить положение разведочных скважин, особенно когда предполагается несоответствие в плане между фиксируемым малоглубинными исследованиями очагом разгрузки и фактическим положением на глубине водовыводящего канала. При предварительной разведке из всего комплекса использованных при поисках методов выбираются наиболее эффективные. Сеть наблюдений в несколько раз сгущается. Иногда используется только сейсморазведка. Приведем несколько примеров использования структурных геофизических методов.

В 1965 г. под руководством В. В. Гуденко проведены геофизические работы в Южном Казахстане на участке, прилегающем с востока к г. Чимкенту, для прослеживания тектонического нарушения и уточнения места бурения глубоких разведочно-эксплуатационных скважин на термальные воды. Район исследований приурочен к восточной части Чимкентского предгорного артезианского бассейна. В геологическом строении района принимают участие массивные палеозойские и песчано-глинистые мезо-кайнозойские образования. В южной части исследуемой площади проходит широтное поднятие Карагаш, с севера оборванное субширотным Чимкентским разломом. При поисках термальных вод эта зона разлома к востоку от г. Чимкента считалась наиболее перспективной. Термальную воду предполагалось использовать для теплофикации г. Чимкента, а также в бальнеологических целях. В начале 60-х годов была пробурена серия скважин вдоль северного склона массива Карагаш. Хотя гидрогеологам и было известно, что здесь где-то проходит крупная зона разломов, точное положение ее не было установлено. Это привело при бурении к отрицательным результатам. Так, скв. З-С на глубине примерно 700 м врезалась в палеозойские породы, не обнаружив термальных вод. Тогда были привлечены геофизические работы для изучения рельефа фундамента и установления точного положения зоны разлома. В качестве основного метода исследований избрана сейсморазведка КМПВ. Отработаны три субмеридиональных профиля, пересекающих зону разлома на расстоянии 5 км друг от друга. Об-

щая длина профилей — 75 км. Изученная ими площадь — около 300 км. Результативный масштаб исследований (с учетом ранее выполненных геофизических работ) — примерно 1 : 100 000. При сейсморазведке использовалось продольное профилирование с полной корреляционной системой наблюдений. Длина годографов — до 12 км, расстояния между пунктами взрывов — 3—4 км, расстояния между сейсмоприемниками — 50 м. Взрывы производились из скважин глубиной до 30 м, средняя масса заряда — 130 кг. По сейсморазведке удалось хорошо изучить рельеф поверхности фундамента (рис. 10). Пробуренная скв. 2-Т подтвердила надежность сейсмических данных и вскрыла термальные воды.

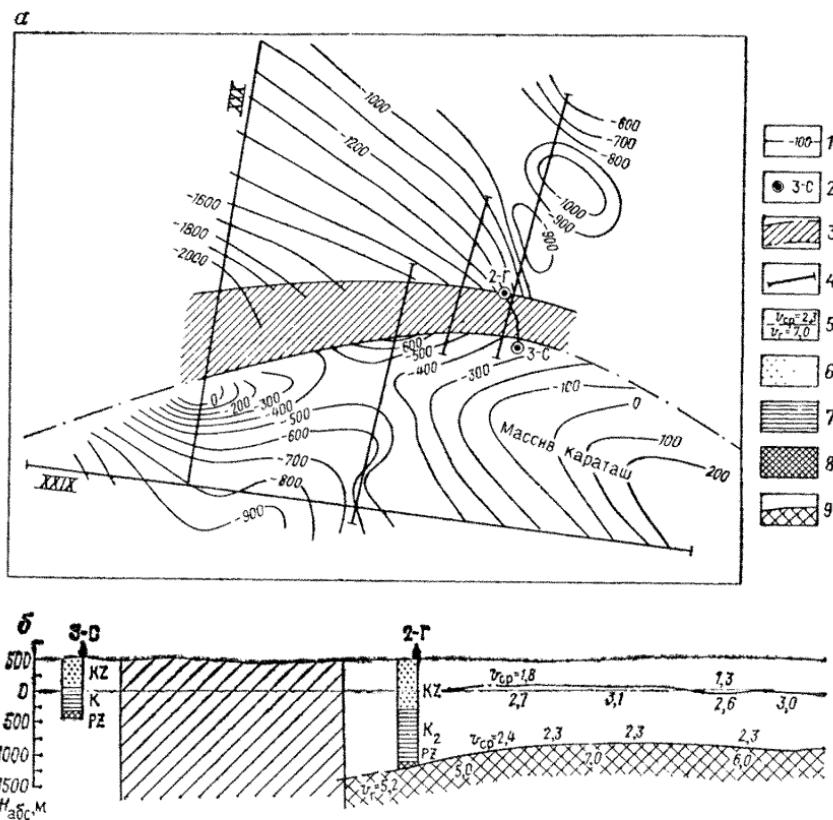


Рис. 10. Результаты сейсморазведки при поисках термальных вод в районе г. Чимкента (по В. В. Гуденко, 1965 г.)

— структурная карта по поверхности складчатого основания; б — сейсмогеологический разрез; 1 — изогипсы поверхности складчатого основания (палеозойских пород), м; 2 — глубокие скважины на карте и их номера; 3 — зона разлома; 4 — сейсмические профили и их номера; 5 — границы на разрезе, выявленные сейсморазведкой КМЛР, значения средних $v_{ср}$ и граничных v_p скоростей, км/с; 6 — кайнозойские отложения; 7 — меловые отложения; 8 — палеозойские породы; 9 — складчатое основание на разрезе по данным сейсморазведки

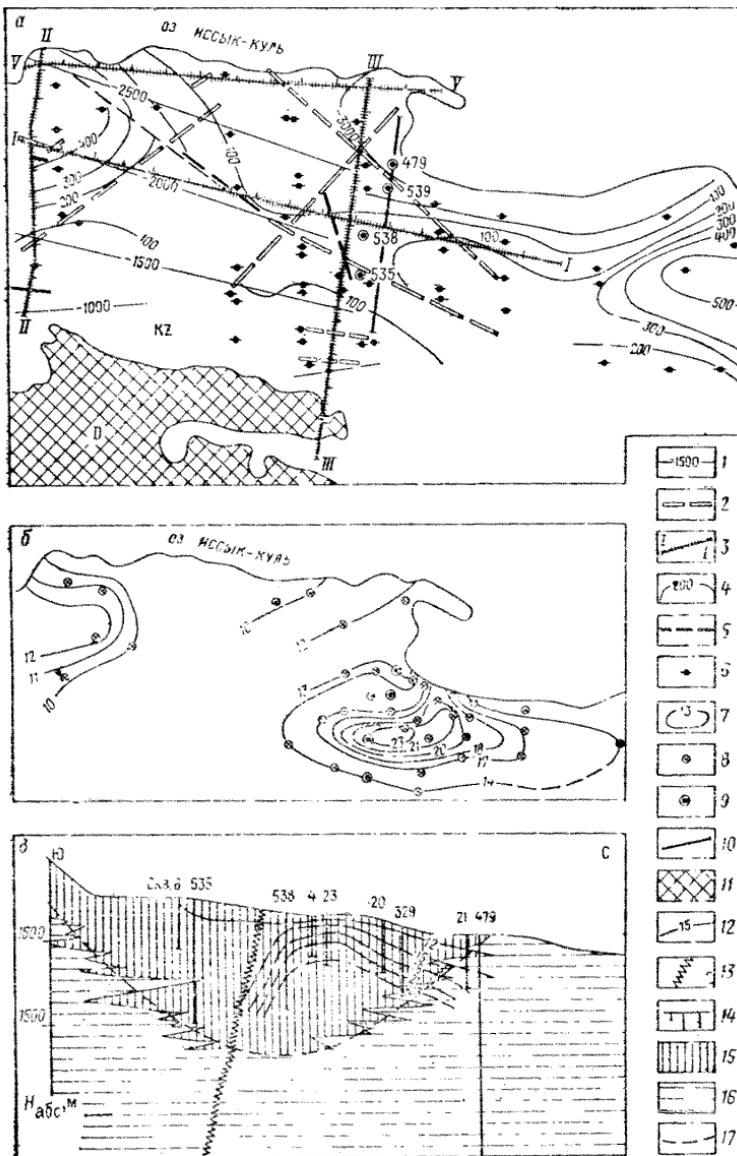


Рис. 11. Результаты геофизических исследований при поисках термальных вод на участке Тоссор — Тамга в юго-восточной части Иссык-Кульского артезианского бассейна (по данным В. Н. Макеева, А. К. Сабитова, 1974 г.).

а — результаты сейсмо- и электроразведочных работ; б — карта термометрических наблюдений; в — геотермический профиль 1—1; 1 — изогипсы опорного отражающего горизонта (относного предположительно к поверхности фундамента), м; 2 — разломы на картах, по сейсмическим данным; 3 — линии сейсмических профилей и их номера; 4 — линии равных глубин по данным ВЭЗ, м; 5 — крупные разломы по данным ВЭЗ; 6 — точки ВЭЗ; 7 — изотермы по скважинным наблюдениям на карте, °С; 8 — скважины с геотермическими замерами; 9 — гидрогеологические скважины; 10 — линия геотермического

Другой пример относится к изучению Иссык-Кульского межгорного артезианского бассейна, отличающегося сложными природными условиями. В 1971—1972 гг. В. Н. Макеевым и А. К. Сабитовым проводились комплексные геофизические работы в юго-восточной части на участке Тоссор — Тамга с целью поисков термальных минеральных вод. В пределах этого участка площадью около 50 км² требовалось с помощью геофизических методов изучить геолого-структурную обстановку, выявить зоны водоподводящих разломов и оконтурить площади, где эти воды циркулируют на минимальной глубине. На участке прослеживается серия субмеридиональных складчатых структур, осложненных разломами того же простирания. Глубина до фундамента составляет несколько километров. Верхняя часть разреза мощностью от 100 до 500—600 м сложена грубообломочными отложениями. В них циркулируют пресные грунтовые или слабонапорные воды. Уровень грунтовых вод залегает на глубине до 15—20 м. Грубообломочные толщи подстилаются глинистыми образованиями, играющими роль регионального водоупора. В области поднятия мощность водоупора измеряется десятками метров. Ниже залегают весьма мощные слоистые песчано-глинистые отложения с напорными солоноватыми водами. Одной из скважин вскрыты на глубине 50—100 м воды с повышенной температурой; термальные воды, по-видимому, приурочены к антиклинальной структуре, осложненной разломами.

Из геофизических методов использованы сейсморазведка, электроразведка, точечные измерения температур в мелких скважинах и термокаротаж глубоких скважин. Результативный масштаб исследований при площадных наблюдениях — 1 : 25 000 (рис. 11).

Сейсморазведка в модификации МОВ применялась для изучения структурного плана складчатого основания и осадочного покрова. Отработано четыре профиля МОВ общей протяженностью в 28 км, отстоящих друг от друга на 1—2 км. Расстояние между сейсмоприемниками принималось равным 30 м. Взрывы производились в мелких шурфах и скважинах глубиной до 20—50 м. Сложные поверхностные сейсмогеологические условия потребовали большого расхода взрывчатки: отдельные заряды достигали 1000—1500 кг. Основное отражение, судя по смежным участкам, приурочено к поверхности фундамента. В верхней части разреза отмечена также серия отражающих площадок. Установлено моноклинальное погружение фундамента в сторону оз. Иссык-Куль, осложненное разломами различных направлений. Амплитуда смещения блоков достигает не-

профиля; 11 — выходы на поверхность домозойских пород; 12 — изотермы на разрезе, °С; 13 — крупные разломы на разрезе по геофизическим данным; 14 — буровые скважины на разрезе и их номера; 15 — грубообломочные породы по данным ВЭЗ и бурения; 16 — песчано-глинистые образования по данным ВЭЗ и бурения; 17 — обобщенная граница между грубообломочными и песчано-глинистыми породами

скольких сотен метров. Сейсмический материал чрезвычайно сложный, вследствие чего как маркирующая поверхность, так и зоны разломов, несмотря на большие затраты (более 100 тыс. руб.), изучены недостаточно надежно.

Использовались две модификации электроразведки — ВЭЗ и ЕП. Целью метода ВЭЗ было изучение тектоники участка и выделение площадей, перспективных на термальные воды. Наблюдения методом ВЭЗ проведены по серии меридиональных профилей с разносами AB_{\max} до 6—8 км. На большей части площади удалось расчленить разрез на две толщи. Верхняя из них высокоомная, ее сопротивление варьирует от 200 до 2500 Ом·м. Она соответствует аллювиально-пролювиальным грубообломочным образованиям. Нижняя толща — низкоомная (10—40 Ом·м), увязывается с глинистыми и песчано-глинистыми образованиями, верхние горизонты которых являются региональным водоупором. Наиболее четко по ВЭЗ определена мощность грубообломочных отложений верхней толщи. На участке хорошо прослежена антиклинальная структура, в центре которой наблюдаются геотермические аномалии. Попытка авторов связать низкоомные участки разреза с зонами растека термальных вод сделана недостаточно убедительно, поскольку разрез весьма сложный. К недостаткам работы следует отнести неоправданно густую сеть наблюдений по ВЭЗ при разносах AB_{\max} до 6—8 км. По-видимому, до 50% всех точек можно было выполнить со значительно меньшими разносами AB_{\max} .

Метод ЕП ставился с целью оконтуривания участков восходящего потока термальных вод. Наблюдения выполнены по сети 250×50 м. Исследовался наиболее перспективный участок площадью 20 км². Путем специальной обработки материала аномалии ЕП разделили на региональную и локальную составляющие. Интенсивность последних достигает 10—30 мВ. Положительные аномалии совпадают с зоной сравнительно низких температур грунтовых вод (10—12°C); эти аномалии скорее всего связаны с холодными восходящими потоками грунтовых вод.

Для прямых поисков термальных вод использована геотермическая съемка. С этой целью на участках общей площадью 5 км² пробурено около 40 скважин диаметром 151 мм, глубиной от 25 до 85 м. Скважины расположены по субширотным профилям. В среднем выдержанна сеть 250×500 м. Большинство скважин пробурено на 15—20 м ниже уровня грунтовых вод с тем, чтобы можно было производить замеры температур, не подверженных ни суточным, ни сезонным колебаниям. Для измерения температуры в качестве датчиков использовались термисторы ММ 1 и ММ-4, заключенные в латунные ампулы и опускаемые на каротажном кабеле. Исследовались необсаженные скважины. Сразу же после окончания бурения спускался каротажный кабель с термисторами. Скважина засыпалась грунтом для восстановления естественного температурного режима. По-

скольку диаметр ампулы термисторов меньше диаметра кабеля, представлялось возможным по мере необходимости извлекать последний из скважины. Первый замер (на забое) производился через 3 сут после завершения бурения. Затем через сутки делали контрольный замер. Если расхождения в показаниях не превышали 0,3–0,5°C, замер признавался удовлетворительным. Далее, вверх по стволу скважины, с шагом через 5 м производились замеры по всему интервалу. В отличие от верхних 10–30 м разреза замеры на больших глубинах характеризовались высокой стабильностью. Это позволило построить температурные карты с сечением 1–2°C (см. рис. 11). Особенно наглядна геотермическая карта, на которой зафиксированы значения температуры на глубинах, расположенных на 15 м ниже уровня грунтовых вод. Здесь выделяется четкая положительная аномалия, приуроченная к антиклинальной структуре осадочного покрова. По-видимому, наличие положительной структуры и разломов способствует вертикальному подтоку термальных вод в зоне этой аномалии.

Таким образом, наиболее эффективной оказалась геотермическая съемка в комплексе с электроразведкой методом ВЭЗ. Использование сейсморазведки МОВ, ориентированной на изучение глубокого опорного горизонта, несмотря на большие затраты, не позволило выявить складчатые структуры в покрове и проследить достаточно надежно разломы. Связано это с чрезвычайно сложными и неоднородными сейсмогеологическими условиями. Очевидно, при такой ситуации целесообразно применять сейсморазведку лишь на региональном этапе общегеологического изучения межгорной впадины.

Месторождения, связанные с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие напорные горизонты. Этот тип месторождений наиболее труден при исследовании как традиционными гидрогеологическими, так и геофизическими методами. Сложность заключается в том, что циркуляция минеральных вод происходит на значительной глубине, структурные контролирующие факторы выявляются слабо, а поверхностное проявление таких месторождений практически отсутствует. Эти условия наиболее типичны для некоторых месторождений углекислых вод района Кавказских Минеральных Вод (КМВ) и Армении. В то же время опыт имеется лишь по КМВ. В связи с этим для наглядности методику разведки рассмотрим на практическом материале указанной группы месторождений. Эти работы, растянувшиеся на несколько десятилетий, к сожалению, не являются наилучшим примером эффективного использования геофизики. Тем не менее они чрезвычайно показательны, поскольку их успехи и неудачи могут помочь в выборе методики при исследованиях в аналогичных условиях.

Район КМВ объединяет серию месторождений, приуроченных к Минераловодскому своду, осложненному отдельными ло-

кальными структурами и разломами продольного и поперечного направлений [36]. Многие локальные структуры представляют собой лакколиты. Разрез имеет двухъярусное строение: фундамент представлен метаморфизованными и сильно дислоцированными породами домезозойского возраста, покров — более молодыми полого залегающими терригеническими и карбонатными породами.

В связи с необходимостью изыскания новых источников минеральных вод в 1948—1954 гг. на территории КМВ, охватывающей площадь около 2500 км², проводились широкие поисковые геофизические исследования методами электро-, сейсмо-, грави- и магниторазведки. Основное назначение геофизических работ — изучение глубинной тектоники района, выявление локальных структур, зон разломов и трещиноватости. Масштаб исследований — 1:50 000, местами 1:100 000—1:200 000.

В обобщенном виде геоэлектрический разрез центральной части района, судя по параметрическим ВЭЗ у скважин, характеризуется следующим соотношением электрических сопротивлений:

$$\rho_0 \geq \rho_1 > \rho_2 < \rho_3 \rightarrow \infty,$$

где ρ_0 — сопротивление почвенного слоя; ρ_1 — сопротивление четвертичных отложений, изменяющееся от нескольких единиц до нескольких десятков ом-метров; ρ_2 — сопротивление пород палеогенового возраста, варьирующее от 6 до 13 Ом·м; ρ_3 — сопротивление высокоомного опорного горизонта, относимого к карбонатным отложениям верхнего мела (возможно, к нижним горизонтам палеогена).

Кровля опорного горизонта залегает на глубине до 500—1000 м, а в зоне отдельных лакколитов выходит на дневную поверхность. На самом юге исследуемой территории по ВЭЗ (ДЗ) удается проследить поверхность фундамента, перекрытого песчано-глинистыми породами юры — нижнего мела. Исследования методом ВЭЗ (ДЗ) носили преимущественно маршрутный характер. Разносы AB (OO') варьируют от 6 до 10 км, шаг наблюдений 3—5 км, но в зоне локальных структур — 0,5—1 км. Судя по данным контрольных скважин, а также сейсморазведочных работ, методом ВЭЗ (ДЗ) удалось с достаточной степенью точности (порядка 10—15%) изучить гипсометрию поверхности карбонатных пород верхнего мела, отметив антиклинальные поднятия и подтвердив те из них, которые ранее были известны по геологическим данным.

Большое внимание исследователями уделено изучению зон разломов. В условиях КМВ это чрезвычайно важный вопрос, поскольку по глубоким разломам из глубин фундамента поступает углекислый газ и только в зонах разломов отмечается высокая водообильность минеральных вод. В то же время, как показали опытные параметрические работы, трещиноватость в

песчано-глинистых породах кайнозоя отметить практически невозможно. Это заставило исследователей сосредоточить внимание на известняках верхнего мела, залегающих на глубинах 300—500 м и более. Для изучения трещиноватости на такой глубине использовались СЭП, ДЭП, ВЭЗ и ДЗ. Первоначально применялись симметричные установки с разносами AB до 1000—1200 м (С. А. Шмарьян, 1953 г.). Работы оказались неэффективными: зоны трещиноватости, обнаруженные по гидрографическим данным, не фиксировались ни ВЭЗ, ни ЭП. Это заставило перейти к более чувствительным дипольным установкам с разносами OO' при ДЗ — 7 км, при ДЭП — 3,5—4,5 км (И. Н. Соколов, Ж. Б. Аванесова, 1954 г.). Шаг наблюдений по методу ВЭЗ составил 0,4—0,8 км, по ДЭП — 100—150 м. Основным объектом изучения являлась Ессентукская зона разломов. Эта полоса интенсивно трещиноватых пород прослежена ранее по буровым данным на несколько километров в северо-восточном направлении от г. Ессентуки. Ширина ее колеблется от 500 до 800 м. Геофизические наблюдения поставлены по трем профилям: один из них проходит вдоль северных окраин г. Ессентуки, второй — на 4 км северо-восточнее от него и третий — в 10 км от г. Ессентуки, вдоль южных склонов гор Бык и Верблюд. На первых двух профилях зона разломов зафиксирована ДЭП в виде минимумов кажущегося сопротивления. На кривых ДЗ в зоне разломов угол наклона правой восходящей ветви уменьшается от 45° до 22°. Отдельные графики КВЭЗ дают также очень четкие результаты. Но севернее, на последнем профиле, зону разломов уже не удалось зафиксировать ни одним из методов. Необходимо подчеркнуть, что вблизи г. Ессентуки известняки верхнего мела находятся на глубине 400—500 м, а вблизи горы Бык — 1000 м.

Исследования с целью выявления зон разломов были проведены также на Нагутском участке. Геофизические профили здесь проложены через 0,5—1 км. Глубина до кровли известняков верхнего мела составляет по данным бурения скв. Р-2 520 м. Эта же глубина установлена по ДЗ. Повсеместно на участке кривые ДЗ имеют правые ветви, восходящие под углом 45° к оси абсцисс. Минимумов r_k по ДЭП также не обнаружено. Скорее всего на участке отсутствует четко локализованная протяженная зона трещиноватости, но имеется трещиноватость, приуроченная к сводам структур.

С 1950 по 1953 г. В. Т. Троянским и другими на площади КМВ проводились сейсморазведочные работы КМПВ. Этот метод был ориентирован, главным образом, на составление структурной карты по поверхности пород верхнего мела центральной части района. Метод отраженных волн в условиях КМВ оказался недостаточно результативным, он использован в небольшом объеме лишь для определения эффективных скоростей. Изученная площадь составляет около 2000 км²; длина профилей, отра-

ботанных КМПВ, — 1000 км; проведен сейсмокаротаж восьми глубоких скважин. При площадных работах профили разбиты через 1—3 км друг от друга. Прокладывались обычно продольные, а в условиях сложного рельефа — непротивоположные профили. Сложные сейсмогеологические условия заставили использовать при прослеживании поверхности известняков верхнего мела полную корреляционную систему профилей с встречными и на-гоняющими геодографами. Взрывные скважины бурились до глубин 20—30 м, средняя масса заряда составляет 20—25 кг. Зона малых скоростей исследовалась через 1,5—2 км, что явно недостаточно. Группирование сейсмоприемников и взрывных скважин не производилось. Расстояние между сейсмоприемниками не превышало 30 м. Взрывной интервал варьировал от 2,25 до 3,75 км. Длина геодографов обычно не более 6,75—7,5 км. Поверхностные сейсмогеологические условия в районе трудные, особенно там, где на поверхности обнажаются известняки, плотные мергели. В центральной части КМВ зафиксировано до 12—14 преломленных волн, три из них связаны с палеогеном, остальные — с породами верхнего мела ю, возможно, нижнего. Наиболее четкой является волна, преломленная от поверхности верхнемеловых известняков. Установлены следующие значения граничных скоростей (м/с): мергели среднего хадумского горизонта — 3000—3300, отложения оползневого горизонта — 3200—3600, мергели ессентукской свиты — 4200—4800, кровля известняков К₁ — 4800—5700. Делалась попытка проследить преломленные волны от палеозойского основания, однако это оказалось практически не разрешимой задачей, поскольку породы палеозойского возраста покрыты мощными слоями пород с большой скоростью, которые служат экраном по отношению к фундаменту.

Сейсмическими методами в районе КМВ, несмотря на большой объем работ, не выявлено ни одного разлома и ни одной зоны дробления. Даже на участках, где геологической съемкой были установлены разломы, сейсморазведка не отметила их. Как объясняют исследователи, это вызвано незначительной амплитудой вертикального смещения и небольшой шириной зоны дробления; однако Ю. Н. Годин (1953 г.) высказал иное суждение: «Ввиду того, что в отчете не приведены разрезы по ЗМС, не представляется возможным проанализировать участки аномальных сейсмических записей, некоторые из которых могут представить определенный интерес в отношении наличия здесь тектонических нарушений или скрытых интрузивов». Таким образом, вопрос о прослеживании разрывных нарушений оказался нерешенным. В результате исследований по данным КМПВ после сводной интерпретации всего материала составлена структурная карта по поверхности известняков верхнего мела в масштабе 1 : 100 000 с сечением 100 м.

Одновременно с сейсмо- и электроразведкой проведены

среднемасштабные гравитационная и магнитная съемки с целью изучения состава и рельефа поверхности фундамента и прослеживания крупных зон разломов (Ю. С. Дежанова, 1952 г.). Обе съемки охватывают большую часть территории КМВ.

Изучение плотностного разреза района показало, что средняя плотность третичных пород составляет $2,3 \text{ г/см}^3$, мезозойских — $2,6 \text{ г/см}^3$, палеозойских — $2,7 \text{ г/см}^3$, т. е. основная гравитирующая граница приурочена к поверхности карбонатных пород верхнего мела. Кроме того, возможны гравитационные аномалии, связанные с плотностной неоднородностью фундамента. Однако гравитационная съемка оказалась недостаточно эффективной в связи с редкой сетью наблюдений, невысокой точностью и упрощенной обработкой гравитационных данных.

В последние годы в результате высокоточных гравиметрических наблюдений (М. Л. Хацкель, 1974 г.) выявлена серия положительных аномалий и доказана их связь с поднятием поверхности меловых отложений. Обнаружение в районе станции Нагуты локального поднятия привело, как показало контрольное бурение, к открытию крупного месторождения углекислых вод.

Магнитная съемка выполнена также в среднем масштабе. Карта аномальных значений ΔZ составлена с сечением 50 гамм. В целом результаты магниторазведки недостаточно выразительны и мало способствуют решению поставленных задач.

На основании проведенного выше анализа можно заключить, что в районе КМВ выполненные в разные годы геофизические наблюдения позволили изучить в общих чертах тектонику района. Из использованных методов эффективными оказались электро-, сейсмо- и частично гравиразведка. Однако с позиций современных требований эти работы обладают серьезными недостатками, вследствие чего не решена главная задача — не прослежены зоны разломов и региональной трещиноватости. Совершенно не реализованы для этого большие возможности сейсморазведки. Изучение глубин до поверхности карбонатных пород верхнего мела можно было с достаточным успехом и значительно с меньшими затратами выполнить с помощью ВЭЗ, попутно решив при этом и другие задачи.

Пластовые месторождения минеральных вод. Поиск пластовых месторождений заключается в оконтуривании перспективных площадей; эта задача, как правило, решается на основании имеющихся ранее полученных материалов: опробования глубоких опорных, нефтеразведочных и других скважин, данных структурно-картировочного бурения, материалов региональных, нефтеразведочных и других геофизических работ, охватывающих значительные территории. Последние, после извлечения информации, характеризующей структуру бассейна, желательно подвергнуть специализированной повторной интерпретации, ориентированной на решение гидрогеологических вопросов. Та-

кие построения выполняются в масштабе 1:200 000—1:500 000. При этом используются данные электроразведки (ВЭЗ, ДЗ), сейсморазведки (МОВ, КМПВ), гравиразведки и др.

В качестве примера приведем результаты специализированной геофизической интерпретации, выполненной в 1968—1970 гг. И. М. Мелькановицким по Приташкентскому предгорному артезианскому бассейну с целью оконтуривания перспективных площадей на термальные минеральные воды [46].

Разведка пластовых месторождений также в большинстве случаев производится по готовым материалам геолого-гидрологических и геофизических исследований; в пределах выделяемых перспективных площадей на те или иные минеральные воды требуется наметить пункты, наиболее благоприятные для заложения скважин и последующего каптажа этих вод. Здесь учитывается прежде всего глубина горизонта, так как обычно стремится задавать скважины в антиклинальных зонах. Во внимание принимаются также условия изолированности целевого пласта от выше- и нижележащих водоносных горизонтов и другие соображения. Готовые материалы сейсмо- и электроразведки обычно дают ответ на эти вопросы.

В редких случаях приходится вести полевые сейсмо- и электроразведочные работы. В результате этих исследований строятся результативные карты в масштабе 1:50 000—1:100 000. Площадь исследований составляет несколько десятков квадратных километров.

Скважинные геофизические методы

Месторождения минеральных вод предгорных и межгорных артезианских бассейнов и артезианских склонов, где в основном коллекторами являются породы осадочного комплекса, имеют много общего с месторождениями платформенных областей, но отличаются своеобразными чертами строения и развития. Эти различия выражаются в локальном характере водоносных зон, сложной тектонике и морфологии складчатых форм и в связи с этим в преобладающем трещинном и трещинно-жильном типе пористости, значительных глубинах залегания, высоких пластовых давлениях и температурах.

Проведение геофизических исследований связано с трудностями, обусловленными спецификой гидрологических, тектонических, геотермических условий, фациальным непостоянством коллекторов, разнообразием минерализации и состава подземных вод (нередко весьма загазированных), избыточными напорами. Последние вызывают сильную изменчивость физических параметров горных пород, а следовательно, и тех физических полей, которые являются объектом геофизического наблюдения. Из-за указанных трудностей предъявляются повышенные требования не только к точности измерения, но и к корреляционным

связям между физическими параметрами горных пород и их геологическими свойствами и выбору приемов интерпретации, основанных на более полном учете всех геологических данных и факторов, характеризующих месторождения.

При изучении этого типа месторождений геофизические методы сохраняют прежние принципиальные направления: изучение геологического разреза, местоположения коллекторов, особенностей тектоники и литологии и там, где позволяет комплекс проведенных исследований, количественная оценка гидродинамических характеристик пород и определение фильтрационных потоков и состояния фильтра. Как правило, в скважинах, особенно глубоких, запланировано проведение КС, ПС, БКЗ, ГК, НГК, ГГК, кавернometрии, термометрии, резистивиметрии (для изучения электропроводности бурового раствора и реже со специальными целями), газового каротажа, расходометрии.

Поставленные геологические цели достигаются в основном рациональным комплексированием указанных методов и при значительной сложности геолого-гидрогеологических условий введением более информативных методов, в частности, микропондирования, повторного БКЗ, акустического каротажа и других, поскольку условия бурения скважин (на глинистом растворе, при значительных диаметрах скважин) во многих случаях позволяют использовать методы нефтегазовой геофизики. Комплексное применение геофизических методов тяжело входит в практику работ гидрогеологических организаций, очень велика потребность в специальных скважинных снарядах для исследования в скважинах на воду с их спецификой проводки и конструкции.

В последние годы разработана и выпущена малыми сериями переносная каротажная станция для гидрогеологических скважин первых сотен метров, предназначенная для записи КС, ПС, МСК, МЭИ, кавернometрии, резистивиметрии, термометрии. На базе расходомеров ТСР-34/70 и ДАУ-3 создан и прошел производственные испытания расходомер РПС-3, имеющий высокую чувствительность и хорошо работающий при любых промывочных жидкостях, различных температурах и давлениях (И. Т. Сквородников, 1976 г.).

Для глубоких, высоконапорных горизонтов термоминеральных вод рекомендуется использование дебитомеров ЭДИС — КГУ комбинированной электронной дистанционной аппаратуры, объединяющей манометр, термометр и дебитометр, которая позволяет в действующих скважинах определить эпюру удельного водопритока, профили притока, динамику температурного режима, давление. Аппаратура учитывает специфику исследования глубоких горизонтов и была успешно опробована на месторождениях термальных вод Дагестана (Н. Н. Непримеров, Е. Ф. Болгарина, 1968—1969 гг.). Сопоставления геофизических и гидродинамических данных с результатами послойного опробования

ния пластов дебитометром ЭДИС-КГУ, выполненные для скважин Махачкалинской площади, показали хорошую их сходимость и подтвердили информативность метода при исследовании фильтрационных свойств разреза (З. А. Водоватова. 1972 г.).

В последнее десятилетие при поисках и разведке минеральных и термальных вод переходят на глубокое бурение: минеральные воды обнаружены на глубинах 1500—2000 м на Северном Кавказе, 2500 м в Средней Азии, до 3000 м на Черноморском побережье Кавказа. В этих районах при решении задач гидрогеологии все чаще приходится сталкиваться с необходимостью учета специфики термодинамического режима, в том числе при разведке методами каротажа. Возможности геофизики и рациональное ее использование в этих условиях зависят от достоверности определения физических свойств пород, слагающих месторождения, и закономерных связей последних с гидротермальными процессами [14, 23, 61]. Это необходимо, поскольку в пластовых условиях действие высоких температур и давлений вызывает деформацию коллекторов и качественное изменение их пористости и проницаемости не только вследствие уменьшения вязкости пластовых флюидов (В. М. Добрынин, 1965 г.; Г. М. Авчян, 1966 г.; Л. П. Петрова, 1969 г.; З. В. Степанкевич, 1972 г.; З. А. Водоватова, 1972 г.). Физически связанная вода под влиянием высоких температур земных недр может, по-видимому, перейти в подвижную форму (А. Ф. Макаренко, 1967 г.; Н. А. Огильви, 1959 г.; Б. В. Дерягин, 1960 г.). В пользу этого предположения свидетельствуют материалы экспериментального исследования проницаемости и электропроводности песчано-глинистых пород, отобранных из скважин некоторых месторождений термальных и минеральных вод Дагестана с глубин 1000—1800 м при одновременном воздействии на них высоких температур и давлений [14].

Исследования проводились на установке высокого давления (УИПК), моделирующей на образце внешнее всестороннее давление p_g (аналог горного) и внутреннее давление жидкости в порах породы p_{pl} (аналог пластового). Термостатирующее устройство установки позволяет выбирать температурный режим от 20 до 100°C (М. К. Калинко, 1963 г.). Образцы, выпиленные из монолитов и предварительно насыщенные рабочим электролитом, помещались в камеру высокого давления, где изотермически нагружались до эффективного давления

$$p_{\text{eff}} = p_g - p_{pl},$$

свойственного их глубине залегания. Величина p_{eff} не превышала значений, соответствующих глубинам отбора образцов, во избежание нарушений в них природных структурных связей; неизменной сохранялась величина градиента напора электролита. В таких условиях керн выдерживался до стабилизации скоро-

сти фильтрации через образец. Далее режим опыта заключался в ступенчатом повышении температуры через 10–15°C до получения пяти-шести сходных замеров контролируемых параметров. В качестве модели пластового электролита был выбран раствор 0,1 н. NaCl, близкий по составу и концентрации к природным водам среднемиоценовых отложений. Высокие пластовые давления, создаваемые в установке, исключали возможность изменения агрегатного состояния электролита и степени насыщенности им породы при повышении температуры до 100°C.

Фильтрационные свойства глинистых песчаников и глин с ростом температуры от 20 до 80°C повышаются более чем в 1,5–2 раза, а для некоторых образцов даже в 3–3,5 раза (табл. 5). Повышение проницаемости породы $k_{\text{пр}}$ наблюдается

Таблица 5

Номер образца	Пористость, %	Глинистость, %	p_g , кгс/см ²	$p_{\text{пл}}$, кгс/см ²	Проницаемость по азоту, мД	Проницаемость, мД в водном растворе NaCl при температуре, °C			$\frac{k_{\text{пр}80}}{k_{\text{пр}20}}$
						20	50	80	
Раствор 0,1 н. NaCl									
1	26,05	0	300	100	434	93	100	99	1,06
2	25	0	300	60	387	31,8	33,0	41,8	1,3
3	16,06	0	300	120	35,0	0,43	0,55	0,5	1,16
4	—	17	200	50	11,2	1,1	1,7	2,2	2,0
5	11,92	13	200	50	14,7	1,03	1,2	1,7	1,62
6	—	23	150	80	85,0	—	0,11	0,18	—
7	—	19	150	80	78,0	0,08	0,14	0,17	2,1
8	8	36	300	150	50,0	0,04	0,08	0,16	4,0
9	10,08	27	300	150	25,8	0,09	0,19	0,26	2,9
Раствор 1 н. NaCl									
10	—	23	150	80	85,0	1,83	1,93	2,2	1,2
11	11,92	13	200	50	14,7	2,2	2,36	2,47	1,1

П р и м е ч а н и е. Пористость дана по лабораторным определениям при атмосферном давлении: p_g — давление обжатия образца, соответствующее горному давлению по глубине его залегания; $p_{\text{пл}}$ — давление воды, соответствующее давлению пластовых вод.

уже при температурах 35–40°C и наибольшей интенсивности достигает в области температур 50–80°C. Эффект проявляется тем сильнее, чем выше содержание глинистого материала в образце и меньше минерализация пластовых вод, лю-видимому, вследствие изменения свойств физически связанный воды в порах породы.

Известно, что нарушение структуры слоя прочносвязанной воды (адсорбционного) наступает при температурах, значительно превышающих 100°C. В связи с этим отмеченный эффект повышения $k_{\text{пр}}$ в глинах и глинистых песчаниках, по мнению авто-

ра, обусловливается переходом слоев рыхлосвязанной воды наименьшего энергетического уровня связи (осмотической) в свободное состояние, что увеличивает эффективный объем поровых каналов и повышает проницаемость породы. Таким образом, данные эксперимента позволяют предположить, что температура — именно тот фактор, который в естественных условиях залегания водоносных горизонтов увеличивает не только их пористость и проницаемость, но одновременно и водонапорную способность слабопроницаемых глинистых образований, что также необходимо учитывать при изучении месторождений минеральных вод.

Корректировка техники производства геофизических работ и методики интерпретации получаемых результатов для месторождений предгорных и межгорных бассейнов и склонов необходима еще и потому, что присутствие в пластовых водах газа снижает эффективность акустического метода; близость минерализаций бурового раствора и пластовой воды ухудшает качество электрометрических кривых (КС, ПС); напорный характер пластов, загазованность вод и значительные глубины залегания коллекторов делают невозможным проведение резистивиметрии и расходометрии для изучения притока вод в скважину по схемам, нашедшим применение в гидрогеологии [17, 21]. Искажающее влияние присутствующего в породе глинистого материала сильно сказывается на результатах электрометрии и нейтронного каротажа: рассчитываемые значения пористости превышают действительные. Ошибки в определении исходных параметров увеличиваются еще больше из-за присутствия в породах пресных или слабоминерализованных вод, так как сила физико-химического взаимодействия на границе пластовая вода — порода во многом меняет представление об электрических и фильтрационных характеристиках коллекторов. Для уменьшения искажающего влияния указанных физико-химических процессов в результаты измерений вводят поправки, откорректированные применительно к гидрогеологическим условиям конкретного месторождения по схеме, рассмотренной для месторождений платформенного типа (см. раздел III). Такие прогнозы являются особенно успешными в районах со спокойным залеганием слоев (в пределах артезианских склонов), где коллекторы имеют тип пористости, близкий к межзерновому.

Особенность карбонатных коллекторов со сложной структурой порового пространства — это высокая степень их неоднородности как по разрезу, так и по площади месторождения. Решающую роль с точки зрения как емкости, так и фильтрационных свойств играют пустоты вторичного происхождения, которые обеспечивают хорошую водопроводимость коллекторов. Но, если по геофизическим признакам положение коллектора устанавливается довольно надежно, водоотдачу их прогнозировать слишком трудно.

По данным промыслово-геофизических методов эти коллекторы не всегда имеют устойчивый комплекс признаков, однако наиболее характерными для них являются следующие: коллекторы с низкой пористостью (не более 5%) отмечаются средними и высокими значениями сопротивлений на диаграммах КС и микрозондов, высокими значениями радиационного γ -излучения; трещинные и смешанные коллекторы с более высокими значениями пористости (порядка 15%) выделяются по схеме гравилярийных коллекторов. Выделить их в разрезе можно по количественному параметру — пористости пласта, определяемой двумя независимыми способами (по КС и НГК).

Из-за сложности изучения этого типа коллекторов необходимо использовать повторное измерение электрического сопротивления при смене бурового раствора, повторные каротажные зондирования, временные замеры сопротивления и других параметров, основанные на изучении зоны проникновения промывочной жидкости во времени [23, 48, 50]. Прямыми методами изучения фильтрационной характеристики разреза являются резистивиметрия и расходометрия, которыми предпочтитаются пользоваться при гидрогеологической разведке.

Рассмотрим примеры использования геофизических скважинных методов при изучении различных типов разреза месторождений предгорных и межгорных артезианских бассейнов и склонов.

Возможности геофизических методов исследования скважин в песчано-глинистом разрезе хорошо рассмотреть на примере месторождений термоминеральных вод Дагестана (З. А. Водоватова, 1972 г.). В геологическом строении района, располагающегося в юго-восточной части Терско-Каспийского передового прогиба, участвуют отложения мезо-кайнозойского комплекса, рассматриваются породы караганского и чокракского возраста среднего миоцена, представленные тонкослоистым чередованием песчаников, алевролитов и глин с подчиненными прослойками доломитизированных мергелей. В гидрогеологическом отношении исследуемая территория относится к Дагестанскому среднемиоценовому артезианскому склону; водовмещающие породы — к песчано-алевролитовым пачкам караганского и свит *A, B, V* чокракского горизонтов, залегающих на глубинах 800—2500 м. Отложения литологически неоднородны, в разрезе наблюдается смена минерализации и состава вод, для месторождения характерны высокие пластовые давления и температуры. Указанные особенности разреза снижают информативность геофизических методов, комплекс которых состоит из КС, ПС, БКС, ГК, НГК, резистивиметрии, термометрии, инклинометрии, кавернометрии и в исследовательских целях дебитометрии аппаратурой ЭДИС-КГУ (Н. Н. Непримеров, 1968 г.). Критериями выделения в разрезе водоносных пачек служат следующие признаки. Горизонты с пониженной минерализацией пластовых вод выделяют-

ся удельными сопротивлениями порядка 20 Ом·м, положительными и отрицательными аномалиями кривой ПС (0—12 № 3), низкой интенсивностью γ-излучения, высокими значениями на кривой НГК, уменьшением диаметра скважины, положительными аномалиями на термограммах.

Водоносные горизонты с высокоминерализованными водами характеризуются низкими удельными сопротивлениями (0,5—1 Ом·м), отрицательной амплитудой аномалии ПС (25—125 мВ), низкой γ-активностью, высокими и средними значениями на кривой НГК, снижением диаметра скважины, положительными аномалиями на термограмме. Особенности интерпретации кривых электрометрии для коллекторов рассматриваемого типа месторождения термоминеральных вод в зависимости от минерализации последних рассматривались в разделе II (см. рис. 3).

В районе КМВ в неглубоких скважинах на минеральные воды исследования выполняются методами КС, ПС, ГК, резистивиметрии, инклинометрии, термометрии. С целью выделения в разрезах скважин бороносных пород и интервалов с минеральными водами комплекс иногда дополнен методом ГГК (В. М. Мерных, 1963 г.).

Пример изучения карбонатного разреза на Ольховском участке (скв. 89, 90) различными методами каротажа показан на рис. 12. Исследовались известняки, песчаники и алевролиты мелового возраста с целью уточнения литологического расчленения разреза и выделения обводненных зон, определения естественной радиоактивности пород. По данным геофизики отмечается переслаивание высокоминерализованных и низкоминерализованных разностей, кривая КС, по-видимому, дифференцирована в соответствии с изменением пористости песчаников и известняков, хотя наличие глинистых прослоев не позволило авторам перейти к количественной интерпретации. Разрез исследован на качественном уровне: плотные известняки и известняки с пресными водами характеризуются высокими значениями сопротивления и минимумами потенциалов собственной поляризации, амплитуда ПС уменьшается против карбонатных пород из-за понижения пористости за счет увеличения глинистости разреза; обилие отрицательных аномалий на кривой ПС связывают с обводненностью разреза и наличием в нем многочисленных водоносных пропластков. По кривой НГК против водоносных горизонтов обнаруживается эффект поглощения нейтронов, песчаники и плотные окремнелые известняки меньшей пористости характеризуются повышенными значениями амплитуды на кривой НГК. Метод ГГК после первых пробных исследований был исключен из комплекса, поскольку не дал достаточной информации при расчленении разреза.

Нальчикская глубокая скв. 1 пробурена на минеральные воды на территории курорта «Нальчик» (А. И. Кретова, 1973 г.).

В геологическом отношении скважина расположена на предгорном моноклинальном склоне Большого Кавказа, который в этом районе является краевой частью обширной Терско-Кумской депрессии. В скважине проведен широкий комплекс исследований: КС, ПС, БКЗ шестью зондами, ГК, НГК, кавернометрия, резистивиметрия, термометрия и определение геотермического градиента.

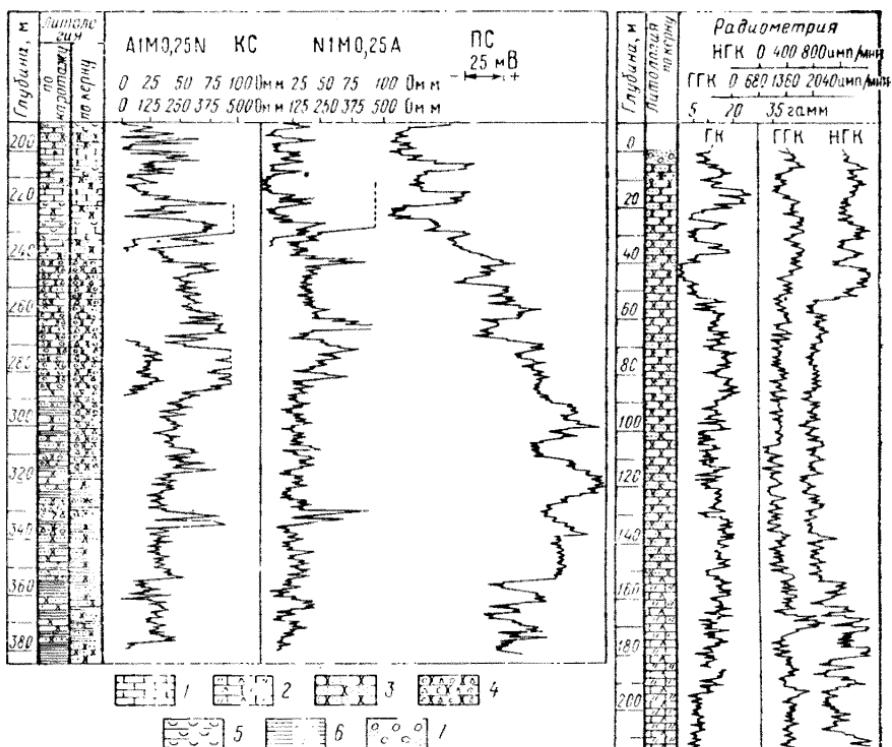


Рис. 12. Каротажные диаграммы по скважинам Ольховского участка КМВ (по В. М. Мерных, 1963 г.)

1 — известняк; 2 — известняк доломитизированный, окварованный, окремицелый; 3 — песчаник; 4 — конгломерат; 5 — ангидрит; 6 — алевролит; 7 — валуно-галечные отложения

ента, инклинометрия, газовый каротаж. Скважина достигла глубины 2400 м и вскрыла отложения (снизу — вверх) меловой и третичной систем.

В разрезе вскрыты семь водоносных горизонтов, приуроченных к коллекторам следующих типов: 1) плотные породы с трещинной циркуляцией (водоносный горизонт меловых пород валькинина, баррема) представлены известняками и песчаниками; 2) породы различной структуры со смешанной циркуляцией — трещинной в зоне плотных прослоев и пластовой в зернистых породах; к этому типу относятся горизонты апт-альбских пес-

ков и песчаников; 3) породы с пластовой циркуляцией в зернистых породах (слабосцементированные пески, песчаники, галечники) среди водоупорных глин — третичная серия нижнего и среднего миоцена, сармат, плиоцен; 4) комплекс глинистомергелистый со слабой трещиноватостью и малой водообильностью — мергели плиоцена, эоцена и верхов верхнего мела.

При изучении всех типов пород рассматриваемого разреза методы выполненного комплекса обладают высокими разрешающими возможностями. Так, с помощью электрометрии (КС, ПС, БКЗ) обнаруживают в разрезе названные выше разности горных пород, которые по значениям сопротивления зоны проникновения считают обводненными. Радиоактивные методы выделяют интервалы низкой глинистости и высокого водосодержания. По кавернometрии отчетливо прослеживается интервал коллекторов. Данные термометрии и газового каротажа отвечают действительному распределению этих параметров в разрезе.

Для промышленного использования после перфорационных работ и гидрогеологических исследований рекомендованы два из семи исследованных интервалов. Нижний (седьмой) водоносный комплекс представлен песчаниками тонкозернистыми, глауконитово-кварцевыми, карбонатными с прослойями песчанистых мергелей. Он выделяется на кривых КС удельными сопротивлениями порядка 4—6 Ом·м, отрицательной амплитудой $\Delta U_{\text{ПС}} = 30 \div 66$ мВ, низкими показаниями ГК и НГК; отмечается повышающее проникновение бурового раствора, свидетельствующее о минерализованности пластовых вод; на кавернограмме выделенный горизонт характеризуется наличием глинистой корки, пластовые температуры выше 90°С. Таким образом, по данным каротажа интервал характеризуется высокими коллекторскими свойствами.

Второй рекомендованный для подсчета запасов горизонт отмечается на глубинах 1016—1063 м и приурочен к чередованию тонкозернистых песков с прослойями глин в отложениях майкопского возраста. По данным кривых каротажа он характеризуется как неоднородный пласт с небольшим повышающим проникновением раствора, удельными сопротивлениями порядка 8—9 Ом·м, отрицательной амплитудой $\Delta U_{\text{ПС}} = 25 \div 30$ мВ. Материалы гамма-каротажа подтверждают неоднородность выделенного для перфорационных работ интервала и свидетельствуют о том, что работающая часть пласта несколько меньше, чем интервал перфорации, и составляет 10 м или самое большее 16 м за счет неоднородной переслаивающейся толщи в интервалах соответственно 1018—1022, 1058—1064, 1030,5—1036,5 м.

Из остальных опробованных интервалов, имеющих незначительные дебиты, на наш взгляд, заслуживают внимания третий и пятый водоносные горизонты, каждый из которых несомненно водоносен, но в очень небольшом по мощности интервале. Соответственно в пятом работающая мощность составляет не-

многим более 3 м (против 31 м перфорационных работ), в третьем по кривой ГК можно для исследований рекомендовать только 12 м или, учитывая зону неоднородности, прилегающую к этому интервалу, не более 20 м (против исследованных 34 м).

Таким образом, результаты перепрепарации показали, что даже при высоком качестве и широком комплексе записанных кривых отсутствие своевременной и квалифицированной интерпретации привело к необоснованным затратам на исследование пяти объектов, которые по результатам каротажа могли быть отнесены к бесперспективным.

В связи с изучением месторождений рассматриваемого типа следует остановиться еще на одном примере использования скважинных методов для решения геолого-гидрогеологических задач при поисках месторождений минеральных вод.

Малкинское месторождение минеральных вод (В. И. Анкудинов, 1973 г.) в структурном отношении приурочено к присводовой части Малкинского палеозойского выступа, который имеет двухъярусное строение: на сложно дислоцированном метаморфическом фундаменте палеозоя залегают породы мезозоя (известняки, конгломераты, алевролиты и аргиллиты). Отложения фундамента представлены серпентинитами. Вся структура осложнена глубинными разломами древнего заложения, часть которых, выходя в более молодые породы из фундамента, гасится, другие нарушения разрывают на отдельные блоки всю толщу пород, в том числе и мезозойские отложения. Тектоника определяет сложную гидродинамическую и гидрохимическую картину месторождения. Водовмещающими являются породы осадочного комплекса (J_3 и K_1). Детально изучены продуктивные водоносные горизонты кимериджа, оксфорда, келловея, триаса, которые содержат кондиционные углекислые минеральные воды. Воды напорные, абсолютные отметки пьезометрического уровня 860—900 м, дебит 0,56—5 л/с, пьезопроводность 10^{16} — 10^{11} м²/сут водопроводность 16—424 м²/сут.

Промысловогеофизические исследования выполнены с целью уточнения контактов литологических разностей пород, определения мощности вскрытых водоносных горизонтов и интервалов интенсивных водопритоков. Комплекс состоял из методов КС, ПС, ГК, механического каротажа, инклинометрии, кавернометрии, определения качества цемента (ОЦК) и торпедирования скважин для улучшения коллекторских свойств продуктивных водоносных горизонтов.

Метод КС по существу использовался для решения задач литологического плана, количественные исследования не проводились. Кривые четко дифференцированы, границы пропластков определяются сменой сопротивления. Кривая ПС существенно дополняет данные метода КС при изучении литологии разреза; водоносные горизонты выделяются отрицательными аномалиями порядка 15—40 мВ в зависимости от глинистости разреза,

минерализации пластовых вод и соотношения последней с величиной минерализации бурового раствора. Метод ГК привлекался для дополнительного уточнения литологии разреза. На стадии детальной разведки массовые поиски не предусмотрены, но так как изучалась одновременно качественная характеристика минеральных вод, попутно с химическим опробованием осуществлялось радиогидрохимическое опробование вод.

Сопоставление каротажных материалов (КС, ПС, ГК) убедило нас, что диаграммы могут не только дать представление о литологии разреза, но и помочь в структурно-тектонических построениях. Так, по геофизическим данным водозаборных скв. 99, 97, 100, 101 четко устанавливается характер погружения пластов в восточном направлении. По одной из скважин месторождения повтор характерных участков диаграммы КС дает возможность предполагать наличие разлома, через который прошла скважина. К сожалению, отсутствие в соседних скважинах кривых ГК не позволяет со всей очевидностью отстаивать это положение. Однако проведенные исследования убеждают нас в том, что даже в сложных тектонических условиях и при ограниченном наборе геофизических кривых можно расширить представления о геологическом строении месторождения.

V. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ТРЕЩИННЫХ МАССИВОВ И ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ

Полевые геофизические методы

Если на площади артезианских бассейнов циркуляция минеральных вод носит преимущественно пластовый характер, то в рассматриваемой области доминируют трещинные, трещинно-жильные и трещинно-карстовые воды. Это накладывает определенный отпечаток на методику геофизических работ. По сравнению с исследованиями в артезианских бассейнах, при изучении трещинных массивов отмечаются: а) сравнительно малая глубина разведки, обычно не более 100—200 м (лишь в области распространения флишевых толщ глубина исследований может быть резко увеличена); б) высокая детальность поисково-разведочных работ и соответственно малая площадь участков, где ведутся эти исследования; в) преобладание в общем комплексе геофизических работ малоглубинных методов исследований, в частности, термометрии, эманационной съемки, электропрофилирования, метода естественных потенциалов и др.; г) использование геофизических методов, направленных преимущественно на картирование вертикальных контактов, особенно зон разломов; д) широкое применение магниторазведки в связи с наличием в разрезе магматических пород; е) ограниченное использование сейсморазведки из-за сложных горно-геологических усло-

вий. Кристаллические щиты платформ и горно-складчатые сооружения достаточно хорошо изучены геофизическими методами при поисках и разведке рудных полезных ископаемых. Это значительно облегчает выполнение прогнозных и поисковых работ на минеральные воды, позволяя сократить объем геофизических наблюдений и площадь исследуемых участков.

При поисках и разведке рассматриваемых типов месторождений в наибольшей мере (по сравнению с ранее описанными объектами) используются геофизические методы. Геологическая, гидрогеологическая и ландшафтная обстановка месторождений весьма разнообразна, и это отражается на методике геофизических исследований. Среди природных факторов, которые существенным образом влияют на геофизическую методику, особо важное значение имеют: региональная геотектоническая позиция месторождений, их локальные структурно-тектонические условия, литолого-петрографический состав коренных образований, мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих коренные породы, физико-химическая характеристика минеральных вод и особенности их гидродинамики, рельеф местности, климатическая зональность.

С точки зрения региональных геотектонических условий месторождения рассматриваемой группы можно разбить на три категории: приуроченные к щитам древних платформ, относящиеся к горно-складчатым сооружениям, образовавшимся в разное геологическое время, но без проявления современного вулканизма, и расположенные на территории горно-складчатых сооружений с проявлением современного вулканизма. Для последних типично сложное сочетание интенсивно дислоцированных пород с молодыми магматическими образованиями, отличающимися высокой магнитностью; это делает магниторазведку незаменимым геофизическим методом. Здесь же весьма характерны интенсивные термопроявления, даже непосредственно на дневной поверхности, что позволяет изучать тепловые поля месторождений как наземными, так и аэрогеофизическими методами.

Одним из основных показателей, характеризующих локальные структурно-тектонические условия, служит конфигурация структур. Особенно важна форма разрывных структур. С этой позиции целесообразно выделить в качестве важнейших структур, контролирующих месторождения минеральных вод, линейные и радиально-кольцевые разломы, образующиеся на площади небольших интрузивов [13]. Локальные структурно-тектонические условия определяют размеры и форму участков исследований.

Заслуживают особого внимания месторождения минеральных вод, приуроченные к отдельным интрузивам. Последние могут выходить на поверхность коренных пород, когда их апикальная часть затронута эрозией, либо располагаться на глубине, внутри коренных образований. Породы, в которые внедрен

интрузив, могут быть осадочными слабодислоцированными, образующими антиклинальные складки лишь в зоне внедрения, и метаморфизованными интенсивно дислоцированными.

По литолого-петрографическому составу и степени метаморфизации коренных пород, слагающих месторождения, можно выделить четыре типичных разреза, в которых доминирующе участие принимают: а) интрузивные и полностью перекристаллизованные метаморфические породы (например, древние щиты и средние массивы); б) интенсивно дислоцированные метаморфизованные преимущественно терригенные породы, переслаивающиеся с эффузивами и прорванные интрузивными телами (значительная часть герцинских и альпийских складчатых сооружений); в) интенсивно дислоцированные, но слабо метаморфизованные флишевые толщи (альпийские сооружения); г) слабодислоцированные, в различной степени метаморфизованные мощные карбонатные толщи (преимущественно альпийские и герцинские сооружения). Первые два типа разреза характеризуются значительной неоднородностью; глубинность полевых геофизических методов (в частности, электро- и сейсморазведка) небольшая, однако магнито- и гравиразведка могут широко использоваться для изучения как глубинного, так и приповерхностного строения месторождений. Разрезы, сложенные флишевыми толщами, близки по своим характеристикам разрезам межгорных и предгорных впадин, хотя и отличаются большей неоднородностью; в ряде случаев удается с помощью метода ВЭЗ оценить мощность этих образований, что позволяет осуществить глубинную структурную разведку.

Разрезы, сложенные мощными карбонатными толщами, достаточно однородны. В целом такие разрезы могут успешно изучаться геофизическими методами; ограничения в основном связаны лишь со сложным горным рельефом. Из геофизических методов в наибольшей мере здесь применимы: при малоглубинных исследованиях карстующихся массивов ВЭЗ, ЭП, КВЭЗ, ЕП, реже сейсморазведка и гравиметрия; при более глубинных структурных работах — ВЭЗ, ДЗ, сейсморазведка, гравиметрия. Часто удается с помощью электрических зондирований фиксировать кровлю и подошву мощных карбонатных пород, залегающих среди разного рода сланцев, флишевых образований, эффузивов и т. п. Примером таких исследований являются электроразведочные работы, проведенные в районе Цхалтубо с целью изучения тектоники мезозойских отложений (И. М. Мелькановский, 1948 - 1950 гг.).

Мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих коренные породы, с которыми связаны минеральные воды, существенным образом влияют на эффективность и использование геофизических методов, их комплексирование, схемы (установки) и сети наблюдений и т. п. При малой мощности рыхлых пород (единицы — первые десятки метров) может быть использовано

наибольшее число методов. Лишь по экономическим соображениям следует отказаться либо резко сократить объем сейсморазведки, высокоточной гравиразведки. При средней мощности рыхлых отложений (от некоторых десятков до 100 м) ряд методов становится практически неприменимым. Таковы эманационная съемка, метод ЕП, иногда термометрия и др.

При значительной мощности рыхлых отложений (100—200 м) комплекс геофизических методов еще более сокращается; в частности, ЭП, КВЭЗ, МЗТ уже обычно нецелесообразно применять для изучения коренных пород и связанных с ними минеральных вод. Сейсморазведку КМПВ желательно использовать для прослеживания зон региональной трещиноватости, выявления разломов, трассирования литологических контактов. Но при этом часто возникает новая помеха — появление в разрезе мощных грубообломочных аллювиально-делювиальных и флювиогляциальных толщ.

Физико-химическая характеристика минеральных вод определяет выбор геофизических методов, используемых при мало-глубинной разведке и ориентированных на прямое обнаружение этих вод. В большей степени это касается исследований подземных вод, отличающихся повышенными минерализацией, температурой, радиоактивностью. Гидродинамические условия также влияют на методику геофизических работ, и это находит отражение в типизации месторождений минеральных вод рассматриваемой группы.

Рельеф местности может быть сравнительно простым либо сложным, горным. Последнее осложняет проведение геофизических работ, заставляет вводить специальные поправки на влияние горного рельефа и в особенно трудных случаях делает вообще использование геофизических методов нецелесообразным. Например, сложный рельеф местности создает значительные помехи, погрешность расчета которых иногда больше искомых аномалий. Иногда не удается использовать электроразведку, так как скалы и обрывы не позволяют осуществить размотку проводов.

Климатическая зональность также оказывает влияние на методику и результаты геофизических работ. Особенно это заметно в аридной зоне и в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Рассмотренные выше факторы способствуют чрезвычайному разнообразию геофизических характеристик анализируемых типов месторождений минеральных вод. В связи с изложенным приводимые ниже рекомендации носят весьма общий характер. В некоторой мере это компенсируется примерами геофизических работ по различным районам страны.

Месторождения минеральных грунтовых вод. В числе наиболее важных месторождений, относящихся к этому типу, следует назвать месторождения железистых, мышьяковистых и ра-

лоновых вод. Железистые и мышьяковистые минеральные воды часто формируются в зоне окисления сульфидных месторождений. Поскольку последние хорошо геологически и геофизически изучены, потребность в специальных геофизических работах при поисках и разведке минеральных вод, как правило, не возникает. Иная обстановка может сложиться, когда месторождений рудных полезных ископаемых нет, но наблюдается рассеянная сульфидная минерализация. Такая минерализация обычно контролируется определенным комплексом пород либо структурными особенностями. Практический опыт использования геофизических методов при изучении месторождений железистых и мышьяковистых вод нам не известен, хотя целесообразность их привлечения не вызывает сомнений. По-видимому, следует использовать методы электроразведки, выбирая установки с небольшой глубинностью. В определенных случаях, видимо, может возникнуть потребность в привлечении магниторазведки. Небольшие размеры месторождений потребуют достаточно детальной сети наблюдений с тем, чтобы результативные карты на различных этапах поисково-разведочных работ можно было строить в масштабе 1 : 1 000 — 1 : 10 000.

При поисках и разведке радионовых вод геофизические методы используются достаточно часто, чему способствуют как высокая практическая значимость месторождений, так и доказанная эффективность геофизических методов. Эти месторождения сформированы в зонах сплошного распространения экзогенной трещиноватости и связаны, как правило, с элювиальными образованиями гранитоидных массивов. В зонах повышенной трещиноватости, которые обычно отличаются усиленной эманирующей способностью пород, обнаруживается максимальное содержание радона и наибольшая водообильность пород. Хотя в рассматриваемом типе месторождений минеральная вода не поступает с больших глубин, а образуется в зоне выветривания, тем не менее участки, где проходят крупные разломы, обновленные новейшими подвижками, представляют для разведки также значительный интерес, поскольку в их пределах эманирующая способность и водообильность пород достигают наибольших значений. По тем же соображениям особый интерес для разведки приобретают экзоконтакты гранитоидных интрузий.

Целью геофизических исследований при поисках радионовых вод является обнаружение и оконтуривание участков, где породы и грунтовые воды отличаются повышенным содержанием радона. Если радионовые воды связаны с небольшими массивами, задача геофизических методов на поисковом этапе может быть ограничена оконтуриванием этих массивов и определением мощности осадочных пород (рыхлых или метаморфизованных), перекрывающих их. Если заранее известно высокое содержание радона в породах гранитоидного массива на обширной площади, но не ясно, где расположены наиболее водообильные участки,

основная задача поисков заключается в выявлении площадей с максимальной трещиноватостью. К геофизическим методам, используемым на поисковом этапе, можно отнести ВЭЗ и ЭП, которые комплексируются с радиометрией, магниторазведкой, иногда гравиразведкой и сейсморазведкой. Применение электроразведки, как правило, обязательно. Этот метод из-за своей универсальности в большинстве случаев дает основу решения всех задач.

Однако неоднозначность этих решений заставляет сочетать электроразведку с одним или несколькими из перечисленных методов, в зависимости от геолого-геофизической обстановки. Так, например, иногда гранитоидный массив по величине электрического сопротивления не отличается от вмещающих его метаморфических пород. Кислые интрузивные породы могут оказаться немагнитными, поэтому для оконтуривания их следует использовать либо гравиразведку¹, либо сейсморазведку КМПВ. Применение последней может оказаться особенно полезным, когда требуется не только оконтурить массив, но и выделить в его пределах узколокализованные зоны трещиноватости.

Во всех благоприятных случаях следует на поисковом этапе применять радиометрию — эманационную съемку; как указывалось выше, решающим фактором является мощность и состав рыхлых пород, перекрывающих коренные образования². В качестве наиболее рациональной системы наблюдений на поисковом этапе используется площадная съемка, сочетающая с профильными наблюдениями. Сеть наблюдений поисковых работ заметно меняется в зависимости от размеров объектов исследований и ряда других обстоятельств, изложенных выше. Обычно при площадной съемке расстояния между геофизическими профилями варьируют от 100 до 500 м, а шаг наблюдений в 2–5, а иногда и в 10–20 раз (при очень вытянутых структурах) меньше, чем расстояние между профилями. Результативные геофизические карты оформляются в масштабе от 1 : 10 000 до 1 : 50 000, реже крупнее. Площадь исследований измеряется десятками — первыми сотнями квадратных километров.

При проведении предварительной разведки более детально решаются сформулированные выше задачи. Особое внимание уделяется оконтуриванию участков, отличающихся повышенной трещиноватостью пород. Изучаются также мощность и литологический состав рыхлых отложений, перекрывающих коренные

¹ Кислые интрузивы, как правило, отличаются дефектом плотности по сравнению с метаморфическим комплексом пород [30].

² По данным В. С. Стеценко и других исследователей, изучавших радионевидимые воды Украинского щита, установлено, что воды с высоким содержанием радиона образуются в зоне интенсивной дезинтеграции коренных пород при условии залегания сверху мощных глинистых экранов. Однако при этом эманационные съемки не фиксируют заметных аномалий. Последние, напротив, отмечаются, по периферии перспективных участков.

образования. Это особенно необходимо для оконтуривания участков, где идет инфильтрация поверхностных и атмосферных вод. Иногда необходимо определять направление, скорость и уровень грунтового потока. На разведочном этапе используются методы, эффективность которых в наибольшей мере проявилась на поисковом этапе (однако реже всего применяются грави- и магниторазведка — это преимущественно поисковые методы в рассматриваемых условиях). Кроме того, в зависимости от дополнительных задач привлекаются методы КВЗЭ, МЗТ и некоторые другие. При использовании ЭП часто применяются более чувствительные схемы. Сеть наблюдений на этапе предварительной разведки в 2–3 раза гуще, чем на этапе поисков. Результативные карты строятся в масштабе 1 : 10 000, иногда крупнее. Площадь разведки измеряется единицами, реже первыми десятками квадратных километров.

Приведем практические примеры использования геофизических методов при поисках и разведке месторождений радоновых вод, связанных своим происхождением с грунтовыми потоками.

Обширные геофизические поисково-разведочные работы на радоновые воды выполнены на Колыванском месторождении в 1974–1975 гг. под руководством С. М. Папки и А. Ф. Бухмастова. Радоновые воды рассматриваемого месторождения приурочены к одноимённому гранитному массиву, расположенному в юго-восточной части Западно-Сибирской низменности вблизи г. Новосибирска (рис. 13). Гранитный массив и вмещающие его породы имеют домозойский возраст и представляют собой выступ герцинского фундамента, местами обнажающегося на дневной поверхности. Гранитный массив вытянут в меридиональном направлении на 20–25 км, ширина его 4–8 км. Массив прорывает осадочные и метаморфические породы D_3 – C_1 . На контакте интрузивных и вмещающих пород отмечаются интенсивные процессы метаморфизма, но вдали от массива контактовый метаморфизм быстро затухает. На севере гранитный массив обнажается; далее к югу он перекрыт рыхлыми отложениями мощностью до нескольких десятков метров. Грунтовые воды в рыхлых отложениях слабо радиоактивные — до 10 эман. Однако воды, циркулирующие в верхней трещиноватой зоне гранитов и распространенные до глубины 80 м, имеют заметную радиоактивность, связанную с растворенным радоном, от нескольких сотен до 11 800 эман.

На Колыванском массиве уже выполнялись геологические, геофизические (электро-, магнито-, сейсморазведка) и отчасти гидрогеологические работы в связи с поисками и разведкой сульфидных руд. Была установлена радиоактивность трещинных вод массива, однако не оконтурены участки, где дебиты радоновых минеральных вод достаточно высоки, чтобы можно было ими обеспечить санаторно-курортное лечение. Задачи геофизических работ заключались в уточнении контура Колыванско-

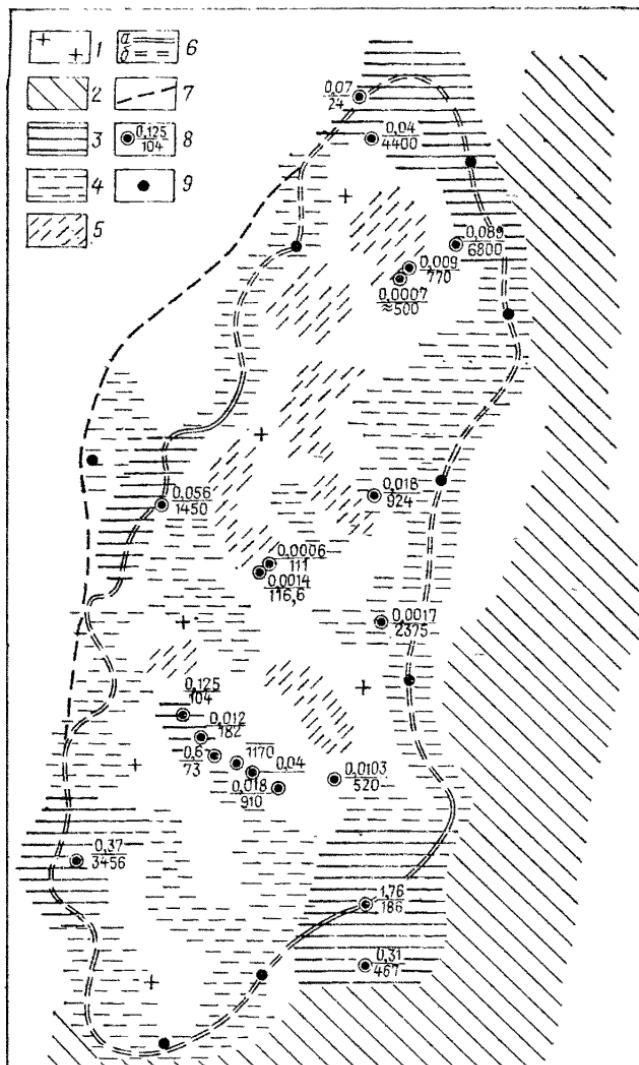


Рис. 13. Результаты геофизических исследований на Кольвянском месторождении радоновых вод (по данным С. М. Папки, А. Ф. Бухмастова, 1974).

Выходы коренных пород под четвертичными образованиями: 1 — граниты (PZ₃); 2 — палеозойские осадочно-метаморфические породы (D₃-C₁); площади, отличающиеся по степени перспективности на радоновые воды: 3 — перспективные; 4 — предположительно перспективные; 5 — малоперспективные; контуры Кольвянского гранитного массива: 6 — по данным электроразведки (а — увереные, б — предполагаемые), 7 — предполагаемые по данным геоморфологических наблюдений с учетом материалов сейсморазведки; 8 — буровые скважины (в числителе — удельный дебит воды, л/с, в знаменателе — концентрация радона в воде, эман); 9 — рекомендуемые места заложения поисковых скважин.

го выступа, выявлении и прослеживании зон дробления и зон разломов. Использованы магнито- и электроразведка в различных модификациях. Стоимость геофизических работ — 69 тыс. руб. Площадь поисковых исследований в масштабе 1 : 50 000 — около 200 км², детальных в масштабе 1 : 10 000 — 10—12 км².

Магниторазведка (в наземном варианте) выполнена в масштабе 1 : 50 000 по сети 500×50 м и 1 : 10 000 по сети 100×25 м. Съемка масштаба 1 : 50 000 охватывает площадь всего массива, а также сопредельные с ним территории, детальной же съемкой (1 : 10 000) исследована северная часть массива — Чаусский участок, представлявшийся гидрогеологам вначале наиболее перспективным. Симметричное электропрофилирование СЭП с разносами АВ в 250 и 500 м проведено на поисковой площади по сети 500×25 м, на детальной — 100×25 м. Магниторазведка и СЭП выполнены для оконтуривания массива и прослеживания зон разломов. С целью оценки мощности рыхлых отложений, а также для определения природы и установления мощности (на глубину) зон пониженных сопротивлений в гранитах (выявленных СЭП) поставлены ВЭЗ с АВ до 1500 м и с густотой наблюдений в среднем пять физических точек на 1 км², шаг наблюдений вдоль профилей — от 250 до 1000 м. Также выполнен небольшой объем КВЭЗ, оказавшихся в общем малоэффективными.

Параметрические замеры показали, что большинство пород объекта, включая и граниты, оказались практически немагнитными. В плотностном отношении фиксируется также слабая дифференциация пород, но все же установлено, что среди доминантных образований граниты — наиболее легкие. Электрическое сопротивление рыхлых увлажненных осадков составляет 60—100 Ом·м, массивных гранитов — более 1500 Ом·м, интенсивно-трещиноватых гранитов — 100—500 Ом·м. Роговики и метаморфические палеозойские породы имеют сопротивления, варьирующие от 100—350 до 2000 Ом·м. Величина граничной скорости v_f в массивных гранитах составляет в среднем 5,0—5,2 км/с, в трещиноватых гранитах — 4,6 км/с, в роговиках и ороговикованных породах — 5,6—5,7 км/с, в метаморфической палеозойской толще — 4,6—5,2 км/с.

С помощью интерпретации результатов магниторазведки не решена основная задача — оконтурить гранитный массив, удалось лишь выявить внутри и за пределами интрузива отдельные жилы и дайки, по-видимому, отличающиеся повышенной основностью. Однако для обнаружения радионовых вод практически это ничего не дало. Недостаточно эффективными оказались также данные электропрофилирования, поскольку на результаты метода исказяющее влияние оказала переменная мощность рыхлых отложений. Наиболее результативен метод ВЭЗ. Большинство кривых ВЭЗ имеет вид Н или КН при сопротивлении опорного горизонта $\rho \rightarrow \infty$. На границе контакта гранитов с роговиками по ВЭЗ (в комплексе с СЭП) отмечаются «карманы»

в рельефе поверхности фундамента, т. е. резкое увеличение здесь низкоомных пород, обязанных интенсивно выветрелым трещиноватым образованиям в палеозойской толще, что явилось основным признаком при оконтуривании гранитного массива.

В результате бурения гидрогеологических скважин установлено, что в центре гранитного массива радиоактивность подземных вод высокая, но водообильность, даже в зонах разломов, установленных по геофизическим и геологическим данным, незначительна. Хорошая водообильность наблюдается лишь по контуру массива (до 1 л/с) при высокой радиоактивности. Пробуренные скважины намечены по данным геофизических исследований. В этом и заключается их основной результат.

Значительно проще оказалась задача геофизических исследований на соседнем участке — «Заельцовский бор», где требовалось оконтурить небольшой интрузив гранитоидов, в пределах которого известны выходы радионевод. Работы выполнены параллельно с исследованиями на Колыванском массиве. Весьма эффективной оказалась магниторазведка; интрузив выделен четкой положительной аномалией.

Месторождения трещинно-жильных водонапорных систем. Эти месторождения приурочены к зонам эндогенией трещиноватости, образовавшейся в основном в результате тектонических движений, их особенность — малые сечения водоносных зон, наличие сосредоточенных потоков минеральных вод [12], поступающих со значительных глубин. Следует иметь в виду, что большая водообильность зон крупных разломов отмечается лишь при активной тектонической деятельности. В противном случае водообильны лишь молодые разломы, оперяющие более древние.

Перед геофизическими методами на стадии поисков ставятся следующие задачи: геологическое картирование коренных пород под покровом рыхлых образований, оконтуривание основных структур района и, главная, обнаружение и прослеживание зон крупных разломов или зон региональной трещиноватости с выделением перспективных на минеральные воды участков. Площадь поисковых работ измеряется единицами и первыми десятками квадратных километров. Расстояние между профилями наиболее часто составляет 100—250 м, шаг наблюдений 20—50 м. Эти исследования обычно обеспечивают построение результативных карт в масштабе 1:10 000 — 1:25 000. Выбор геофизических методов зависит от мощности рыхлого покрова, состава изучаемых коренных пород, физических свойств минеральных вод, разгружающихся в зоне разломов, и др.

При мощности рыхлого покрова, не превышающей единицы и первые десятки метров, используются при благоприятных условиях электропрофилирование, магниторазведка, термометрия, реже (или в ограниченных объемах) — ВЭЗ, КВЭЗ, ЕП, ВП, КМПВ, гравиразведка, эманационная съемка. При боль-

шей мощности покрова из числа перечисленных методов исключаются КВЭЗ, ЕП, ВП, термометрия, эмонационная съемка. Особенностью геофизических наблюдений на всех стадиях исследований является съемка по системе сравнительно коротких профилей, закладываемых вкрест простирания пород с целью решения главной задачи — изучения линейно протяженных зон разломов.

На стадии предварительной разведки геофизические методы применяются для детального исследования перспективных участков: уточнения положения мест разломов, угла падения сбрасывателей, определения зоны дробления, оценки мощности и литологического состава наносов, перекрывающих коренные породы, и т. д. Сеть наблюдений используется густая — (20—50) \times (5—10) м. Площадь геофизической съемки варьирует от нескольких гектаров до 1—2 км². Результаты исследований обеспечивают построение карт масштаба 1:1000 — 1:5 000. На стадии предварительной разведки используются наиболее эффективные методы, привлекаемые при поисковых работах.

Ниже рассматриваются примеры практического использования геофизических методов при изучении анализируемого типа месторождений. При анализе работ на Тянь-Шане рассмотрим исследования по курорту Ходжа-Оби-Гарм, наиболее раннему в Средней Азии объекту комплексного использования геофизических методов. Здесь в 1934 г. а затем в 1949—1950 гг. под руководством Н. А. Огильви проводились геофизические и гидрогеологические исследования. Выходы минеральных источников приурочены к южному склону Гиссарского хребта. Непосредственно на участке месторождения, приуроченного к левому склону долины р. Мазар, коренные породы представлены интрузиями, сложенными гранитами, гранодиоритами и диоритами. Эти образования перекрыты элювиально-делювиальными и аллювиальными породами мощностью до 30—40 м. В структурном отношении район относится к крупному антиклиниорию, ядро которого сложено герцинскими гранитондами. В альпийское время развитие получила разрывная тектоника, зафиксированная в виде серии крупных крутопадающих надвигов широтного простирания. Среди них особо важное замечание для формирования минеральных источников имеет Гушаринский надвиг. Исследованиями, проведенными Н. А. Огильви, доказано, что минеральные воды выходят не по надвигу, а по серии более мелких вертикальных разломов, секущих под острым углом Гушаринский надвиг. Тектонически переработанные и, по всей вероятности, измененные гидротермальными растворами, породы зоны надвига представляют собой не водообильную, а водоупорную толщу. Минеральная вода, идущая по трещинам с глубин, разгружается в рыхлые отложения склона и смешивается с грунтовым потоком. На поверхность выходят многочисленные источники минеральных вод. Максимальная температура воды

достигает 95°C, ее общая минерализация — 0,4 г/л, содержание радона — до 65 эман. В результате работ 1934 г. Н. А. Огильви пришел к выводу, что «минеральная вода, выходящая из трещин разлома, уже обладает своими радиоактивными свойствами, и наносы никакого участия в генезисе радона не принимают».

Основной объем геофизических работ выполнен в пределах Термального склона, где имеется выход минеральных источников (рис. 14). Геофизические работы носили разведочный характер: требовалось уточнить условия выхода минеральных вод, проследив для этого положение главных водовыводящих трещин.

Геофизические работы выполнялись в комплексе с гидрологическими исследованиями. В состав геофизических наблюдений входил метод ЭП (с небольшим объемом ВЭЗ), термометрическая и эманационная съемки. Они проведены по профилям, секущим склон; длина профилей 60 м, иногда более; расстояние между профилями — 20 м, шаг наблюдений — 5 м. Общая площадь участка — 2 га. Эти исследования проведены в мелких скважинах до глубины 1,2 м. При обнаружении интенсивных аномалий скважины стали углублять еще на несколько метров и вновь повторять наблюдения. Масштаб исследований по участку — примерно 1 : 2000. Электропрофилирование в комплексе ВЭЗ проведено по одному профилю, рассказывающему весь участок. При ЭП использована установка $AA'MNB_{\infty}$ с $AO=40$ м, $A'O=10$ м и шагом наблюдений 2 м. Разносы AB_{\max} при ВЭЗ составляют 300 м.

Как можно видеть из серии графиков, построенных по участку (см. рис. 14), геотермические аномалии и особенно зоны с повышенным содержанием радона в почвенном воздухе четко контролируют положение водовыводящих трещин. Эти аномалии хорошо коррелируются от профиля к профилю, что позволяет проследить тектонические нарушения в плане. Концентрация радона в почвенном воздухе над разломами, по которым разгружаются минеральные воды, достигает 500–600 эман, а температура пород в этих же местах — 80°C, причем с ростом глубины те и другие аномалии увеличиваются. В сторону от разломов концентрация радона и температура пород быстро падают. Отмечается незначительное смещение радиометрических и более заметное термометрических аномалий вниз по склону (по отношению к положению разломов). Но в общем это смещение, в связи с малой мощностью наносов и хорошей их проницаемостью, не создает существенных помех при разведке.

Результаты электроразведки также позволяют проследить водовыводящие трещины. Прежде всего отмечается общее уменьшение сопротивления пород в зоне выходов термальных вод. В верхней части разреза коренных образований фиксируется зона пониженных сопротивлений (порядка нескольких десятков ом-метров — см. рис. 14, ВЭЗ № 4), мощность которой

достигает 30—50 м. Однако за пределами участка с термальными источниками сопротивление пород измеряется сотнями ом-метров. Значительно также меняется сопротивление делювиально-аллювиальных образований: выше термальных источников оно достигает 500—600 Ом·м, а в зоне самих источников падает до 50—25 Ом·м. Разломы с выходом минеральных вод отмечаются локальными минимумами сопротивлений до 5—8 Ом·м. Н. А. Огильви отмечает, что сопротивление минераль-

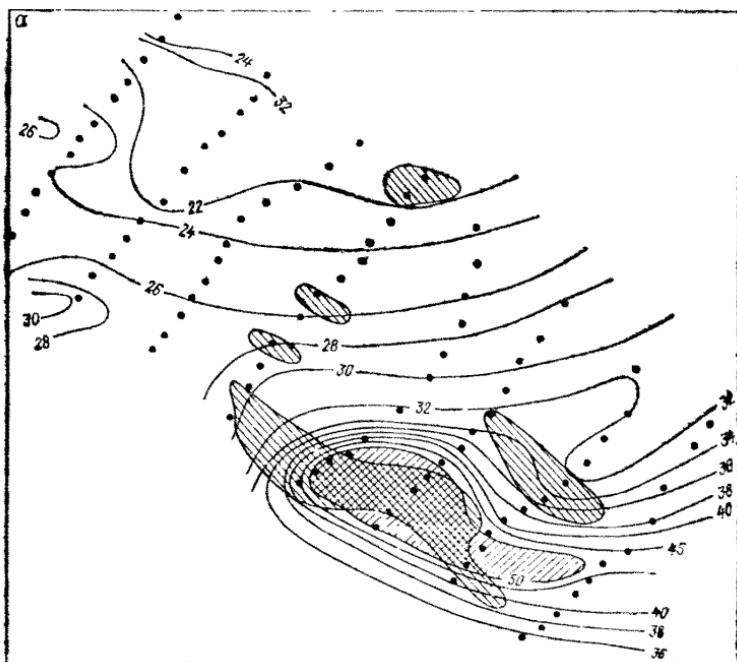


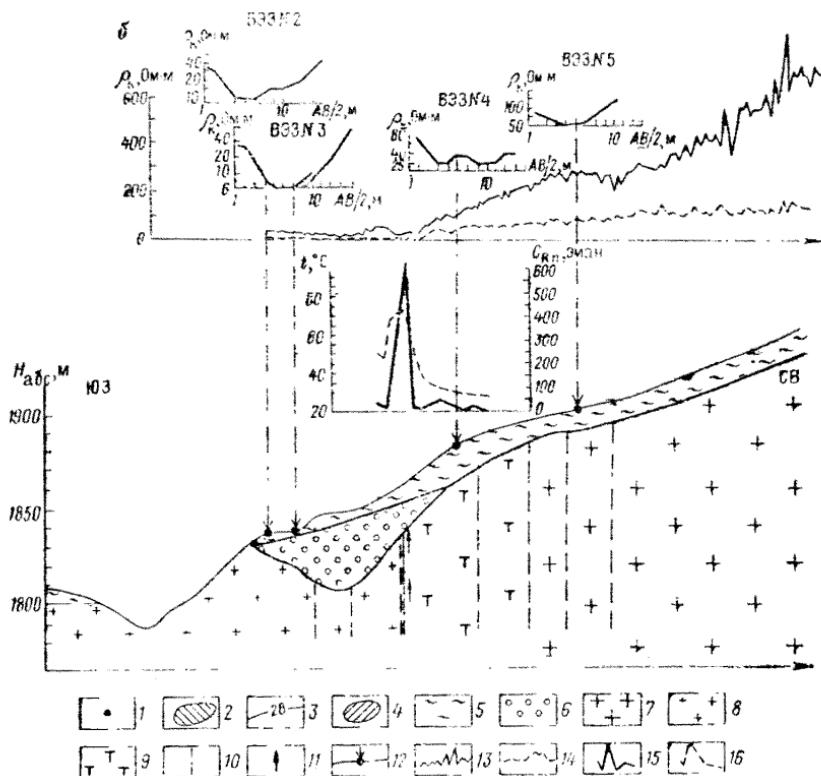
Рис. 14. Результаты геофизических исследований в районе курорта Ходжа-Оби-Гарм (по Н. А. Огильви, 1934—1950 гг.).

а — карта изотерм и участков повышенной концентрации радона в почвенном воздухе; б — совмещенный геологический разрез с результатами геофизических наблюдений по Термальному склону: 1 — пункты геофизических наблюдений; 2 — участок с концентрацией радона более 50 эман в почвенном воздухе на глубине 1,2 м; 3 — изотермы, °С; 4 — участок с температурой выше 80° С на глубине 1,2 м; 5 — современные аллювиальные и делювиальные отложения (суглинки, пески, брекчия); 6 — древнеаллювиальные отложения (крупные валуны, местами сцементированные); 7 — биотит-микроклиновые свет-

ной воды при температуре 70° С составляет 10 Ом·м, т. е. сопротивление пород почти в два раза ниже сопротивления воды, насыщающей эти породы. Столь значительное снижение сопротивления пород объясняется интенсивным химическим воздействием термоминеральных вод на рыхлые породы.

В целом исследования, проведенные в районе курорта Ходжа-Оби-Гарм (в 1934—1950 гг.), оказались весьма эффективны-

ми. Комплексное использование методов геофизики, хорошая увязка геофизических и гидрогеологических наблюдений, оперативное изменение методов работ в процессе исследований в зависимости от получаемых результатов, наличие параметрических замеров и данных по физическим свойствам пород — все это способствовало удачному использованию геофизики при весьма небольших материальных затратах. Описанные работы, несмотря на значительную давность, имеют большое методиче-



ло-серые граниты; 8 — гранит-порфирь светлорозовые; 9 — граниты-катализиты зоны Гушаринского надвига; 10 — сбросы; 11 — восходящие струи термальной воды; 12 — точки ВЭЗ (надими вынесены графики кривых ВЭЗ); графики электропрофилирования установкой АА MN B_∞ : 13— $AO=40$ м, 14— $AO=10$ м; 15 — кривая концентрации радона (C_{Rn}) в почвенном воздухе; 16 — кривая температуры (t) среди

кое значение, они служат хорошим примером использования широкого комплекса методов наземной геофизики в сложных горных условиях.

В последующие годы аналогичные исследования проведены в районе курорта Джеты-Огуз под руководством А. Н. Боголюбова и др. [4]. Геофизические исследования дали большой геологический эффект.

В Забайкалье геофизические работы выполнены при поисках и разведке углекислых, радоновых и термальных вод. В 1967—1976 гг. на Бырылинском месторождении минеральных вод на стадии разведки проводились комплексные работы, включающие геофизические наблюдения и последующее бурение гидро-геологических скважин. Месторождение расположено в Читинской области в 255 км к югу от г. Читы. Коренные породы района сложены исключительно интрузивными образованиями. Подавляющая часть их представлена биотит-рогообманковыми гранитами даурского интрузивного комплекса (PZ_2), которые местами прорваны диабазовыми порфиритами (MZ), образующими вертикальные дайкообразные тела. К началу описываемых исследований было известно, что минеральные воды приурочены к тектоническому разлому в гранитах, по которому произошло внедрение диабазовой дайки. Разлом испытал обновление в кайнозойское время. Мощность рыхлых образований четвертичного возраста, перекрывающих магматические породы, не превышает 5—10 м. Вода Бырылинского источника термальная (45°C), слабоминерализована и содержит от 75 до 106 эманов радона. Вода напорная с самоизливом. На базе источника создана местная бальнеолечебница.

Задачей геофизических исследований явились прослеживание тектонической зоны, подводящей минеральные воды к поверхности, и определение направления погружения этой зоны. Геофизические работы должны были способствовать правильному заложению буровых скважин с тем, чтобы последние пересекли водовыводящий канал и дали максимальный дебит минеральной воды. Геофизические и последующие буровые работы сосредоточены на небольшом участке размером 200×300 м, в центре которого выходят минеральные источники. Масштаб исследований примерно 1 : 2000. В комплекс геофизических работ включены были магнито- и электроразведка, термо- и радиометрия. Затраты на геофизику составили около 4000 руб., или менее 5% от всех затрат.

Магниторазведка выполнена по серии параллельных профилей, пересекающих предполагаемую зону разлома и отстоящих друг от друга на 30—40 м; шаг наблюдений — 5—10 м, при детализации аномалий — до 0,5 м. Аналогичная сеть наблюдений использована для остальных методов. На рис. 15 видно, что диабазы, внедрившиеся в зону разлома, зафиксированы четкими положительными аномалиями до 500—600 гамм. В то же время граниты практически не создают магнитных аномалий. По характеру графика вертикальной составляющей магнитного поля ΔZ можно судить, что диабазовая дайка имеет почти вертикальное залегание при мощности примерно 40 м.

Метод ЕП ставился с целью обнаружения основного выхода минеральных вод в тектоническом нарушении, положение которого определено магниторазведкой. Задача успешно решена: зо-

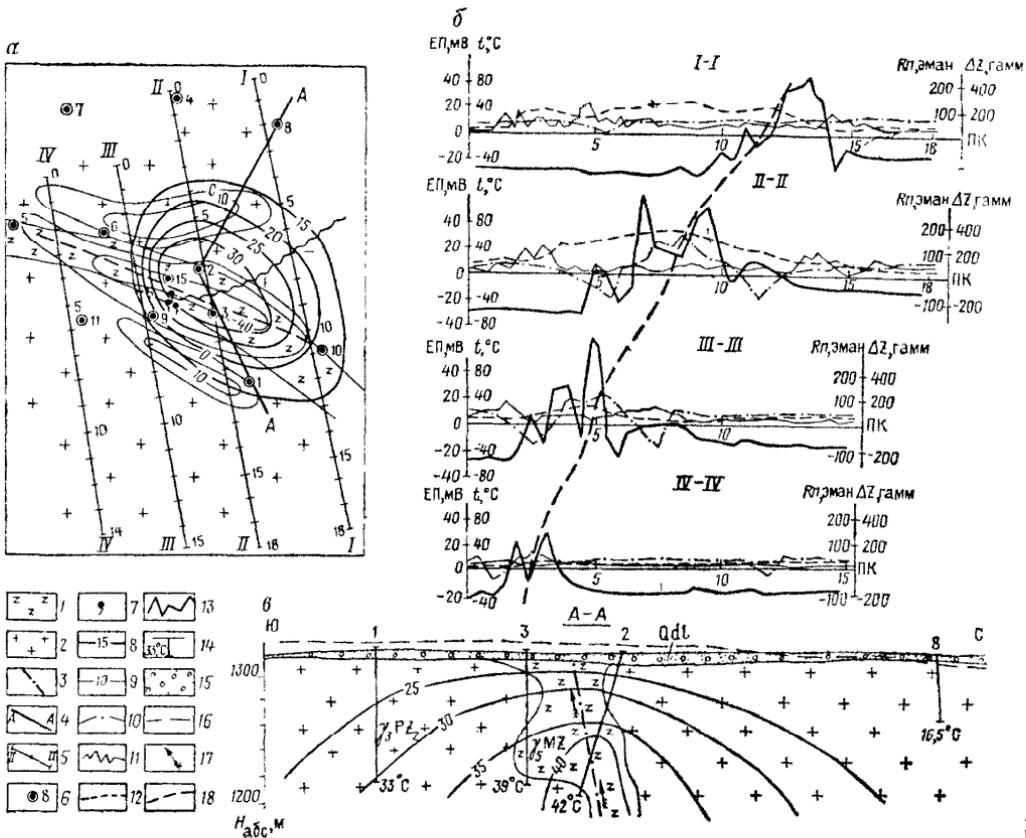


Рис. 15. Результаты геофизических исследований на Бырылинском месторождении минеральных вод (по данным В. Е. Сидорова, 1969 г.):

a — карта изотерм и аномалий естественного электрического поля; *b* — графики геофизических наблюдений по профилям *I—I*, *II—II*, *III—III*, *IV—IV*; *в* — геологический разрез по линии *A—A*; *1* — диабазовые порфириты; *2* — биотит роговообманковые граниты; *3* — термально-дывающие тектоническое нарушение; *4* — линия гидрогеологического разреза *A—A*; *5* — геофизические профили с указанием их номеров и линектов; *6* — буровая скважина и ее номер на плане; *7* — термальные источники; *8* — изотермы, °C (на карте — на глубине 1,2 м); *9* — линии равных значений естественных электрических потенциалов, мВ; графики геофизических наблюдений; *10* — аномальных значений вертикальной составляющей магнитного поля (ΔZ), *11* — естественных электрических потенциалов (E_{EL}), *12* — содержания радиона в почвенном воздухе на глубине 0,5 м (Rn), *13* — температура на глубине 0,5 м (f'); *14* — буровая скважина на разрезе (снизу указаны температура на забое, °C); *15* — делювиальные отложения; *16* — пьезометрический уровень термальных вод; *17* — направление движения термальных вод по разлому; *18* — цызометрический уровень на сентябрь 1969 г.

на разгрузки минеральных вод зафиксирована в виде вытянутой вдоль разлома эллипсовидной положительной аномалии (до 40 мВ), окаймленной с севера и юга отрицательными аномалиями (до -10 мВ) (см. рис. 15).

Термометрическая съемка проведена в шпурах глубиной 0,5—1 м. Четкая аномалия в 30°С фиксирует зону разгрузки минеральных вод (см. рис. 15). Термометрия выполнена также в скважинах через каждые 10 м бурения. Можно заключить, что термальная вода поднимается из глубины по трещиноватым породам дайки (см. рис. 15).

Радиометрические наблюдения свелись главным образом к эманационной съемке. Результаты последней, в отличие от данных остальных методов, нечеткие. Видимо, повышенная проницаемость четвертичного покрова не способствовала концентрации радона в почвенном воздухе.

Применение геофизических методов при разведке Бырылинского месторождения оказалось весьма эффективным. По мнению В. Е. Сидорова, «применение геофизических методов позволило четко выявить положение в плане основного термовыводящего тектонического нарушения в коренных породах под слоями четвертичных отложений и сократило тем самым объем разведочного бурения в два раза. Бурением наклонных скважин установлено распространение термовыводящего тектонического нарушения на глубину, что исключило необходимость бурения более глубоких (200—300 м) разведочных скважин. Сокращение объема разведочного бурения, глубины бурения и сроков проведения буровых работ позволило уменьшить затраты на разведку Бырылинского месторождения в три раза».

В 1962 г. Л. Л. Богдановой проводились поисково-разведочные работы на углекислые минеральные воды в районе среднего и нижнего течения р. Нерчи с использованием геофизических методов: ВЭЗ, КВЭЗ, ЭП, ЕП и микромагнитной съемки. Исследования оказались достаточно эффективными [3].

В заключение рассмотрим примеры использования геофизических методов на площади Монголо-Охотского складчатого пояса. Все примеры связаны с исследованием термоминеральных вод (Кульдур, Мотыклей, Тальск).

В 1961—1963 гг. при разведке термальных вод курорта «Кульдур», расположенного примерно в 100 км западнее г. Биробиджана, использовались геофизические наблюдения. Целью геофизических работ было определение местоположения и элементов залегания зоны тектонического дробления пород, с которой связан выход термальных вод. Геофизические данные послужили правильному заложению квадратных скважин.

Основной структурой района является крупная антиклинальная складка северо-восточного простирания. Крылья ее сложены метаморфическими гнейсами протерозоя. В ядре складки расположен гранитный массив, который проплавил складку в

палеозойское время. Коренные магматические и метаморфические породы района перекрыты маломощными рыхлыми четвертичными образованиями (до 5 м). Очаг разгрузки кульдурских терм, как показали проведенные исследования, связан с крупным тектоническим разломом в гранитном массиве. Термальные воды обладают слабым напором. Это азотные щелочные термы, обладающие температурой до 72°C, содержащие 112 мл/г H_2SiO_3 . Общая минерализация воды 0,3 г/л. По гидрологическим представлениям, термальные воды поднимаются с глубины 2–3 км.

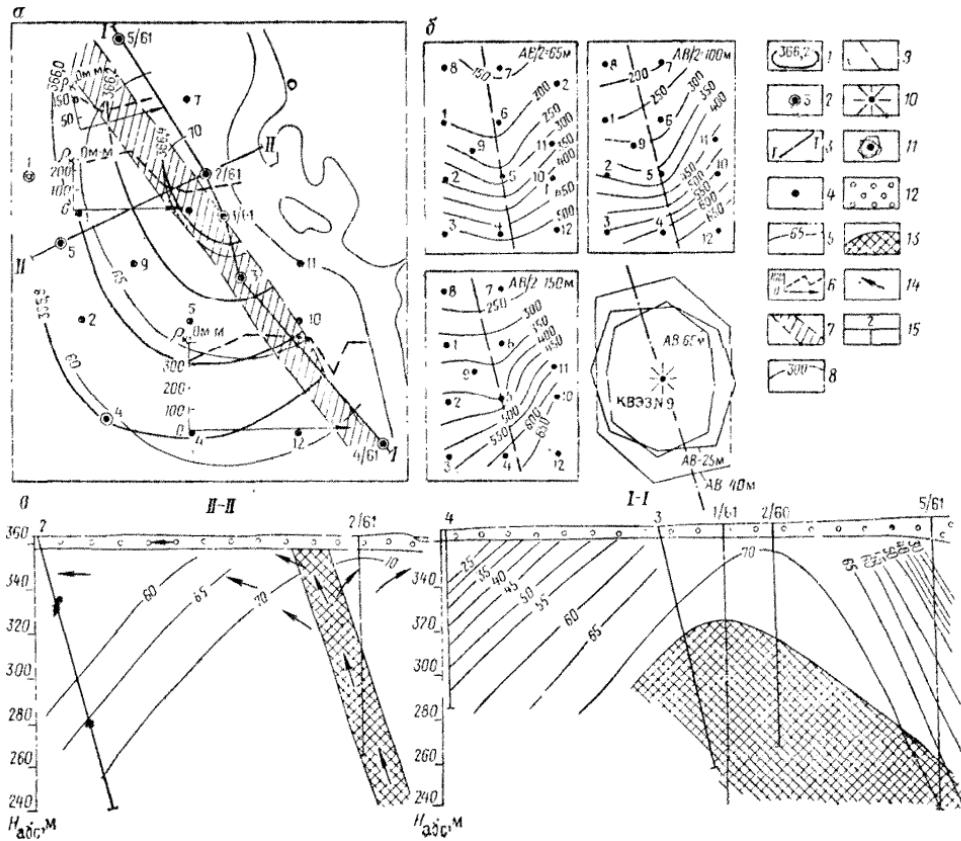
Геофизическим работам предшествовали небольшие опытные электроразведочные работы в 1959 г., проведенные под руководством В. Г. Вебера. Исследования показали, что величина электрического сопротивления трещиноватых гранитов в зоне дробления снижена.

При исследованиях в 1961–1963 гг. было использовано несколько модификаций электроразведки постоянным током: ВЭЗ, КВЭЗ и ЭП. Все работы сконцентрированы на небольшом участке, на так называемой «термальной площадке», по правому берегу р. Кульдур, размером 150×250 м. Первоначально вся территория была изучена с помощью метода ВЭЗ с $AB_{\max} = 300$ м по сети 50×50 м. В центре участка сделано круговое зондирование КВЭЗ. В результате этих работ намечены общее направление трещиноватости и примерное положение зоны разлома (рис. 16).

Проведены детализационные работы с помощью трехгоризонтного профилирования ($AB = 300$, $A'B' = 200$ и $A''B'' = 30$ м) по сети $(25-50) \times 5$ м. Электропрофилирование позволило уточнить положение разлома и сделать вывод о крутом падении его. Термометрические замеры в отдельных неглубоких скважинах согласуются с данными электроразведки. Все это позволило удачно заложить несколько скважин непосредственно в районе термовыводящей зоны и решить задачу расширения ресурсов термоминеральных вод курорта. Общая стоимость затрат на геофизические работы не превышает нескольких тысяч рублей. Таким образом, геофизические наблюдения оказались достаточно результативными, этому способствовала простота геологогеофизических условий.

В 1961–1965 гг. под руководством В. А. Кириллова и Г. В. Введенской проводились комплексные гидрогеологические и геофизические исследования, направленные на поиски и разведку термальных вод в районе Мотыклёйского и Тальского минеральных источников. На объектах успешно использованы электромагниторазведка в условиях многолетнемерзлых пород [50].

Месторождения, связанные с зонами разгрузки глубинных минеральных вод в вышележащие грунтовые и напорные горизонты. В настоящем разделе объединено описание двух типов месторождений, в одном из которых глубинный напорный поток



разгружается в бассейн грунтовых вод, в другом — в вышележащие горизонты напорных вод. Сделано это потому, что в настоящее время затруднительно в сложных условиях горно-складчатых сооружений по геофизическим данным провести грань между обоими типами месторождений. От предыдущего типа рассматриваемые месторождения с позиций разведочной геофизики отличаются главным образом значительной мощностью осадочных слабодислоцированных образований, перекрывающих скальное основание. В эти рыхлые отложения идет разгрузка напорных глубинных минеральных вод, причем мощность покрова может достигать 50—100 м и более. Задачами геофизических методов на стадии поисков являются изучение основных элементов тектоники района, определение мощности осадочного покрова и обнаружение зон разломов, по которым идет поступление глубинных минеральных вод с последующей их разгрузкой в осадочный покров.

На поисковой стадии в различных комбинациях (в зависимости от конкретных геолого-гидрогеологических и геофизических условий) используются преимущественно структурные методы исследований: ВЭЗ (иногда ЭП), сейсморазведка КМПВ, магнито- и гравиразведка. В областях активного вулканизма (Камчатка и др.) возможно также применение аэротермометрических наблюдений. Площадь геофизических исследований измеряется десятками квадратных километров и редко превышает 100 км². Расстояние между профилями основной сети наземных наблюдений варьирует от 100 до 1000—2000 м, чаще составляет 200—500 м. Шаг наблюдений при изучении вытянутых объектов изменяется от 20—50 до 200, реже 500 м. При изучении лакколитов и других изометрических в плане тел сеть наблюдений более равномерная.

Исследования методами, требующими наибольших затрат (КМПВ, ВЭЗ), проводятся по редкой сети наблюдений, ими отрабатываются наиболее интересные профили и маршруты, положение которых уточняется после проведения площадных гравимагнитных наблюдений, электропрофилирования и других исследований, требующих минимальных затрат. На базе этих работ геофизические и результативные гидрогеологические карты в зависимости от сложности природных условий и использованной сети наблюдений строятся в масштабе 1:10 000—1:25 000—1:50 000. В отдельных случаях при поисках применяются также малоглубинные прямые методы, позволяющие обнаружить зоны разгрузки минеральных вод.

На стадии разведки уточняются элементы тектоники выявленных перспективных участков, трассируются зоны мелких разломов, по возможности определяются углы наклона сбрасывателей крупных четко выраженных разломов, уточняются мощность, состав и фильтрационные свойства пород покрова, основные пути разгрузки минеральных вод и смешение их с прес-

ными водами. Особенno важно установить в плане соотношение наблюдаемого в приповерхностной части разреза очага разгрузки с глубинной зоной разлома, из которой поступает минеральная вода. Решение последней задачи позволяет (с учетом других факторов) правильно заложить скважины, которые необходимы для пересечения водовыводящего канала. Комплекс геофизических методов остается примерно тот же, что и на стадии поисков. Дополнительно на ограниченных участках может применяться терморазведка, КВЭЗ, МЗТ. Сеть наблюдений используется такая, чтобы обеспечить построение результативных карт в масштабе 1 : 2 000 — 1 : 10 000. Расстояния между профилями обычно составляют 20—100 м, шаг наблюдений — 5—20 м, реже более. Площадь исследований колеблется от 2—5 км² до нескольких гектаров.

Рассмотрим примеры использования геофизических методов при изучении рассматриваемых месторождений минеральных вод. Примеры приурочены к Кавказу, Камчатке и Курильским островам. По Кавказу приводятся примеры, связанные с изучением Кавказских Минеральных Вод. Общие геологическая и геофизическая характеристики этого района рассмотрены выше. Здесь сосредоточим внимание на особенностях геолого-геофизической обстановки в зоне лакколитов — своеобразных магматических тел, сыгравших существенную роль в формировании и выведении на поверхность напорных минеральных вод. Лакколиты КМВ возникли в начале неогена [36]. Они пережили несколько этапов экструзивной деятельности и окончательно сформировались на границе акчагыльского и ашшеронского веков. Лакколиты представлены главным образом трахилипаратами. Гидрогеологическая роль лакколитов заключается в том, что около них создались линейные, полукольцевые и кольцевые разломы, открывшие путь напорным подземным водам на поверхность. В зоне глубоких трещин разломов происходит подъем и смешивание вод различных горизонтов. Это способствует формированию многочисленных типов подземных вод. Магматическое ядро лакколитов находится на различной глубине: у одних оно обнажено (например, горы Железная, Развалка), у других погружено на значительную глубину.

При геофизических исследованиях ставится в основном задача обнаружения и детального изучения лакколитов, ядро которых не вскрыто эрозией. В этом случае требуется определить глубину до поверхности магматических пород (или до кровли перекрывающих карбонатных образований K_2), установить в плане контуры лакколита и выявить в их зоне крупные разломы. Геофизические исследования носили комплексный характер. Использованы электро-, сейсмо-, грави- и магниторазведка.

Выявление лакколитов, вскрытых эрозией с помощью электроразведки методом ВЭЗ, оказалось несложной задачей, так как в их зоне величина продольной проводимости S резко сокра-

щается. Вокруг лакколитов при мощности кайнозойских пород в 500—1000 м $S=300$ —450 Сим, а в зоне самих лакколитов — менее 100 Сим. Определить глубину до поверхности интрузивного тела можно лишь с большой погрешностью из-за влияния сложного рельефа местности и негоризонтальности изучаемой поверхности. Кроме того, отрицательно сказывается изменение геоэлектрических параметров осадочных пород на контакте с трахилитаритами, так как их сопротивление резко возрастает до 400—1000 Ом·м и становится сопоставимым с сопротивлением пород магматического ядра.

Среди других частных задач, решавшихся электроразведкой, следует отметить определение контуров распространения и мощности травертинов, которые прежде всего указывают на разгрузку подземных вод и позволяют локализовать ее места. Кроме того, с травертинами часто связано образование специфических минеральных вод (например, радионевых). Такие исследования в 1937 г. провел В. О. Урысон на склонах горы Машук. Площадь исследований — около 10 км². Использовались методы ВЭЗ и ЭП с АВ до 300—1000 м. Поставленная задача решена, составлена карта распространения травертинов и изогипс их подошвы. Особенно перспективными на вскрытие минеральных вод являются участки с минимальной мощностью травертинов [58].

Основная задача при применении сейсмических методов сводилась к выявлению и оконтуриванию не вскрытых на глубине интрузивов. Первые такие работы проведены в 1934 г. В. Н. Зандером на площади Кумагорского поднятия. Использовался метод преломленных волн (МПВ) по системе параллельных и поперечных профилей. По прямым и косвенным данным В. Н. Зандер установил следующие значения пластовых скоростей пород для: трахилитаритов — 4000 м/с, мергелей — 3100 м/с, аргиллитов и песчаников — 2300 м/с, майкопских глин — 1750 м/с, меловых известняков — 3500 м/с. В результате исследований сделано заключение, что Кумагорское поднятие связано с внедрением трахилитаритов, залегающих на глубине 80—400 м. Как показали сейсмические работы 1950—1953 гг. и бурение скважин, эти глубины завышены почти вдвое. По-видимому, В. Н. Зандер волну, преломленную от кровли верхнего мела, ошибочно считал преломленной от интрузивного тела.

В 1951 г. М. Н. Лешевич провел детальную съемку методом отраженных волн (МОВ) в районе Лысогорского лакколита по сети профилей 1×1 км. Взрывной интервал составил 575—690 м, расстояние между сейсмоприемниками 25—30 м. Установлено, что в зоне этого интрузива отмечается потеря отражений. Это важный поисковый признак. В последующие годы В. Т. Троицкий изучал лакколиты в районе горы Бык и на Кумагорском поднятии. Использовалось продольное профилирование КМПВ. Зафиксированы быстро затухающие, малонитенсивные дифра-

гированные волны от точек контактов преломляющих горизонтов с изверженными породами. Видимо, это является основным поисковым признаком интрузий закрытого типа.

В целом сейсмические исследования оказались достаточно эффективными при изучении лакколитов. Их недостатком является невнимание к разрывной тектонике. Следует отметить, что при аналогичных работах, проводимых в настоящее время в рудных районах, задачи, связанные с прослеживанием зон разломов, получают положительное разрешение.

Наиболее полные гравиметрические исследования лакколитов связаны с работами Ю. С. Дежановой. Ею детально изучена площадь гор Бештау, Железной, Змейки, Лысой и др. Наблюдения велись по профилям, отстоящим друг от друга на 2—3 км, с шагом наблюдений 0,3 км и точностью $\pm 0,6$ мгаль. Гравиметрическими наблюдениями в северо-западной части района КМВ прослежена зона максимумов аномалий силы тяжести (а. с. т.) с локальными аномалиями, соответствующими сводовым частям Кумагорского и других поднятий.

В центральной части района КМВ Ю. С. Дежановой выделена зона минимумов а. с. т., протягивающаяся от Кисловодска до гор Бештау, Змейка, Железная. Таким образом, почти все лакколиты приурочены к этому региональному минимуму, и лишь гора Лысая создает отдельный максимум. Как показали лабораторные исследования, плотность кайнозойских пород составляет 2,2—2,4 г/см³, мезозойских и более древних — 2,6 и 2,7 г/см³. Основная гравитационная граница в районе приурочена к поверхности карбонатных отложений мелового возраста. Одновременно наблюдаются азональные изменения плотности третичных пород, связанные с внедрением трахитов и липаритов. Так, плотность мергелей оползневого горизонта около хут. Греческого равна 2,22 г/см³, а в приконтактовой зоне лакколитов — 2,4—2,6 г/см³. Плотность трахилипаратов составляет 2,30 — 2,40 г/см³.

Ю. С. Дежанова следующим образом объясняет характер гравитационного поля в зоне лакколитов. В тех случаях, когда сравнительно легкие трахиты или липариты прорывают мезозойско-кайнозойский покров, фиксируются минимумы а. с. т.; если же эти изверженные породы остаются на глубине, создавая лишь антиклинальную складку (типа горы Лысой или Кумагорской), образуется максимум а. с. т. В целом гравиметрические данные в комплексе с другими геофизическими исследованиями дают нужный материал при изучении лакколитов, способствуя их выявлению и познанию глубинной структуры.

Магниторазведочные данные (В. И. Кондратишико, 1957 г.), несмотря на достаточно детальные исследования нескольких лакколитов (в масштабе 1:5000 при среднеквадратичной погрешности наблюдений ± 14 гамм), не дали четких результатов. Связано это, как показало изучение физических свойств пород,

с практической немагнитностью трахилитаритов. Однако на горе Верблюд отмечена крупная аномалия в $+1000$ гамм, по-видимому, связанная не с трахилитаритами, а с другими породами, залегающими на значительной глубине.

Из приведенного обзора видно, что геофизические наблюдения в районе КМВ дали ценный материал, позволяющий выявлять и уточнять некоторые детали глубинного строения лакколитов. Однако рассмотренные исследования выполнены довольно давно и не всегда достаточно целеустремленно с позиции поисков минеральных вод. Достижения современной геофизики позволяют рассчитывать на более высокий ее эффект, в том числе и при решении такой задачи, как изучение путей движения глубоких подземных вод к поверхности.

На Камчатке и Курильских островах проводятся систематические геофизические работы, ориентированные на поиски и разведку термальных и углекислых вод. При изучении месторождений термальных вод исследователи исходят из комплексного их использования: для выработки энергии, с бальнеологическими целями и др. В связи с этим затраты на геологоразведочные работы иногда весьма значительны. Наши примеры охватывают три объекта: «Паратунские источники (табл. 6, рис. 7) и «Горячие Ключи» (табл. 7, рис. 18) на Камчатке, месторождение «Горячий пляж» на о. Купашир (табл. 9, рис. 19).

В 1966 г. под руководством В. К. Соловьева и В. Д. Бубнова [10] проводились геофизические исследования долины р. Паратунки на участке от Среднепаратунских до Северной группы термальных источников. В геологическом строении района принимают участие в различной степени дислоцированные и метаморфизованные эффузивно-пирокластические и интрузивные образования палеогенового и неогенового возраста, перекрытые четвертичными вулканогенными и рыхлыми осадочными породами (табл. 6). Интрузивные образования N_1 представлены липаритами (λN_2), диоритами и гранодиоритами ($\gamma\delta\delta N_1$). Основная структура района — грабен долины р. Паратунки, заложенный в сводовой части крупного поднятия, имеющего северо-восточное простирание. В ядре поднятие сложено образованиями P_3-N_1 , прорванными интрузией миоценовых гранодиоритов. Грабен ограничен разломами северо-восточного простирания, испытывающими подвижки до настоящего времени. Термальные воды пиркулируют преимущественно в породах паратунской свиты и связаны с тектоническими трещинными зонами. По составу это азотные сульфатные натриево-калиевые щелочные воды с минерализацией 1,8 г/л, температура их достигает $80-82^\circ\text{C}$.

Геофизическим исследованиям 1966 г. предшествовали наблюдения, выполненные в 1965 г. под руководством И. М. Зайцева. В 1965 г. были успешно использованы на поисковой стадии сейсмо-, магнито- и электроразведка при изучении тектоники

Таблица 6

Возраст	Наименование свит	Мощность отложений, м	Литолого-петрографический состав пород
Q _{IV}	—	30—130	Грубообломочный аллювий, также базальты
Q _{III}	—	15—20	Ледниковые и водно-ледниковые грубообломочные отложения
Q _{II}	—	До 30	Аллювий высоких террас
Q _I	—	50—150	Туфогенно-осадочная толща, слабо гидротермальноизмененная
N ₂ al	Алнейская	500—600	Базальты, туфы, андезиты
N ₁ br	Березовская	900—1100	Эффузивно-осадочная толща
N ₁ pr	Паратунская	1100—1500	Эффузивно-осадочная толща
P ₃ —N ₁ vl	Вилючинская	1300—1500	Эффузивно-осадочная толща

Таблица 7

Вид геофизических работ	Объем работ	Сеть наблюдений	Назначение работ, особенности методики
Сейсморазведка КМПВ; продольное профилирование по полной корреляционной схеме	Около 50 км	Расстояние между сейсмоприемниками 20 м, между профилями 1,5—2 км; при детализации расстояние между профилями в несколько раз сокращено	Изучение рельефа фундамента и выявление зон разломов. Использована 24-канальная станция ПСЛ-2. Изучение ЗМС — через 1 км вдоль основного профиля. Взрывы в шурфах с массой заряда от 10—20 до 100—160 кг ВВ. Расстояние между пунктами взрыва 220—240 м, 460 м. Длина годографа — 1,0—2—3 км
Круговое электрическое профилирование с $AB = 1000$ и 680 м. наблюдения в восьми азимутах	4 км ² , 40 физических точек	Отдельные пункты наблюдений на сейсмических профилях	Выяснение простирации и оценка степени трещиноватости пород тектонических зон, выделенных по данным КМПВ
Гравиметрическая съемка с точностью $\pm 0,2$ мгал	28 км	(500—1000) \times 100 м	Изучение рельефа фундамента, прослеживание разломов

месторождения. Исследования 1966 г. выполнялись на стадии поисков и предварительной разведки. Масштаб геофизических работ 1 : 25 000. Площадь исследований около 30 км² охватывает долину р. Паратунки, ширина которой достигает 4 км. С помощью геофизической съемки надо было изучить тектоническое строение долины и детально исследовать структуры участков термопроявлений. В качестве основного метода использовалась сейсморазведка КМПВ; в опытном порядке применялось круговое симметричное профилирование и гравиразведка (табл. 7). Основу системы наблюдений составляла серия профилей-поперечников, секущих долину. Общая стоимость физических работ — 120 тыс. руб. (из них на сейсморазведку — около 90%).

По скоростным характеристикам породы района можно разделить на две крупные группы: грубообломочные четвертичные отложения и древние эфузивно-осадочные, интрузивные и метаморфические породы (Р—Q₁). Для первой группы пород пластовые значения скоростей $v_{\text{пл}}$ варьируют от 1,5—1,7 (алевролиты, песчаники) до 1,8—2,3 км/с (гравий, галечник, валуны); для второй отмечается значительно больший диапазон изменений $v_{\text{пл}}$ — от 1,0—1,4 до 5,0—5,7 км/с, причем эти изменения связаны с многими факторами: литолого-петрографическим составом пород, степенью их трещиноватости, характером метаморфизма и т. п. Так, среднее значение $v_{\text{пл}}$ в окварцованных, окремнелых и ороговикованных породах различного состава равно 5,0 км/с, в слаботрещиноватых магматических и метаморфических породах — 4,0 км/с, в неизмененных песчаниках, конгломератах и сланцах — 2,7—2,8 км/с, в интенсивно трещиноватых породах различного состава — 2,0 км/с. Примерно такие же или несколько большие значения имеют граничные скорости v_g по поверхности названных пород.

Удельное электрическое сопротивление ρ аллювиально-флювиогляциальных грубообломочных пород, насыщенных пресной холодной водой, составляет в среднем 200—400 Ом·м, те же породы в зоне аэрации обладают сопротивлением в 1000—10000 Ом·м, а в зоне насыщения термоминеральными водами — 5—10 Ом·м. Туфогенно-осадочная толща, залегающая непосредственно под четвертичными отложениями, в пределах Среднепаратунских термальных источников имеет сопротивление, варьирующее от 3—7 до 10—30 Ом·м, реже более. Эфузивно-пирокластические толщи N₁ обладают в целом значительно большим сопротивлением. Так, андезиты слабоизмененные имеют сопротивление 1600—2500 Ом·м, а гидротермальноизмененные — 500—900 Ом·м. Объемная плотность рыхлых пород (по сравнению с коренными) обладает минимальным значением. Практически это немагнитные образования. Резко возрастают плотность (до 2,6—2,8 г/см³) и магнитная восприимчивость (3000—6000·10⁻⁶ ед. СГС) эфузивных и интрузивных пород различного состава.

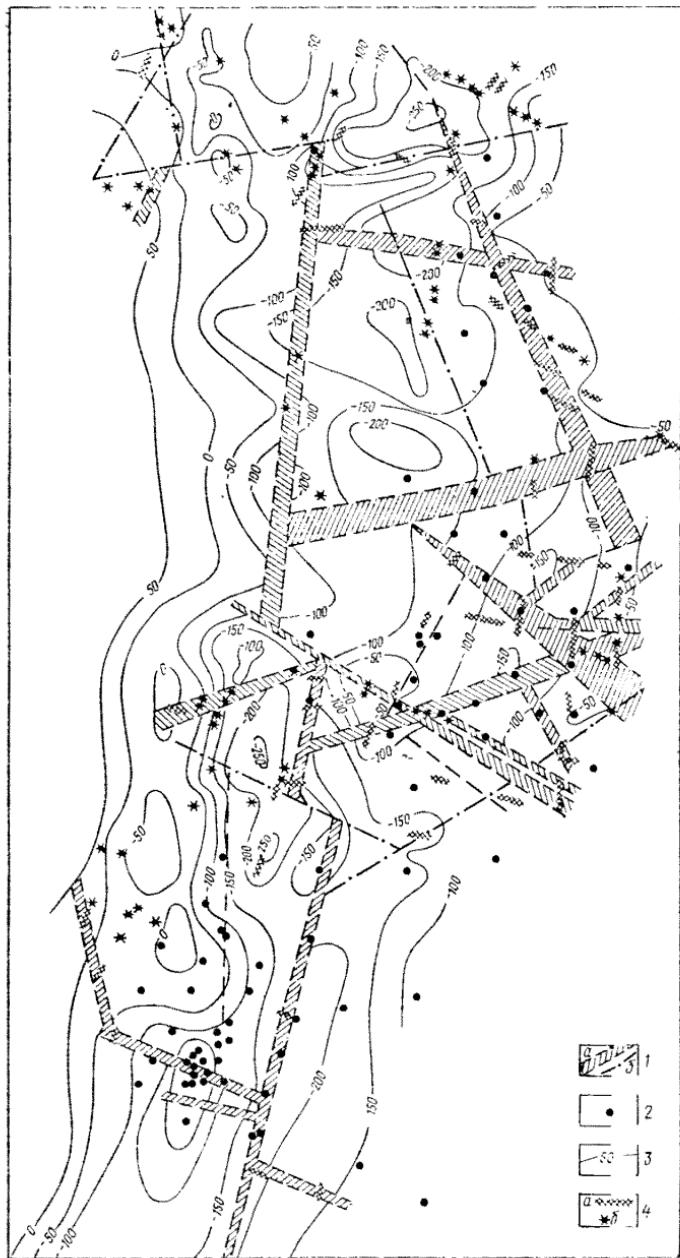


Рис. 17. Карта результатов сейсморазведочных работ в долине р. Паратунки (по данным И. М. Зайцева, 1969 г.).

1 — зоны (а) и оси (б) тектонических нарушений; 2 — буровые скважины; 3 — изоглины кровли преодолевающего горизонта, м; 4 — зоны дифрагированных волн (а) и точки рефракция (б)

В результате сейсморазведочных работ изучен рельеф поверхности фундамента, получен весьма ценный материал по его геологическому строению, особенно расположению зон разломов и участков гидротермальноизмененных пород, перспективных на обнаружение термоминеральных вод (рис. 17). Выделены два типа разломов. К первому отнесены сбросы, хорошо выраженные в виде ступени рельефа маркирующего преломляющего горизонта, ко второму — зоны гидротермальноизмененных пород или развития пород повышенной трещиноватости. Ширина этих зон достигает 170—230 м; по краям зоны наблюдаются две линии дифракции. Одновременно в зоне дробления отмечается аномально низкое значение граничных скоростей. Наряду с указанными типичными случаями зоны разломов могут быть выражены и иначе: либо в виде резкого возрастания граничной скорости v_g на небольшом интервале профиля (в несколько десятков метров), либо только в смене значений v_g . Выявления по сейсмическим данным зон разломов и зон гидротермальноизмененных пород хорошо согласуются с результатами геологического картирования. «Заверочные буровые работы на профилях КМПВ, — пишут В. К. Соловьев и В. Д. Бубнов, — подтвердили правильность интерпретации сейсмического материала. Скважины, заложенные по рекомендации геофизического отряда в пределах выявленных тектонических зон... вскрыли термальную воду». По скв. К-49, заданной по предварительным результатам сейсморазведки и бурения предыдущих скважин, получена максимальная для группы Паратунских месторождений температура разогрева пород 106°C.

Опытные работы по применению кругового профилирования также дали положительные результаты. Установлено, что в зонах распространения трещиноватых пород (выявленных сейсморазведкой и подтвержденных бурением) величина кажущейся анизотропии λ_k заметно увеличивается (иногда до 4) по сравнению со смежными участками, при этом ориентированность эллипсов анизотропии становится более четкой; кроме того, значения λ_k с увеличением разносов AB (от 680 до 1000 м) также возрастают. Таким образом, доказана целесообразность использования методики кругового ЭП или КВЭЗ для обнаружения и прослеживания зон, перспективных на термальные воды (рис. 17).

Менее результативной оказалась гравиразведка. Гравитационная карта имеет сложный характер, по ее данным затруднительно изучить рельеф фундамента, проследить зоны разломов и т. п. Однако малый объем работ, большие расстояния между профилями, отсутствие специальных маршрутов для геологической привязки, упрощенный подход к интерпретации — все это не позволяет сделать окончательного вывода об эффективности метода.

В 1971 г. на о-ве Кунашир в районе месторождения термо-

минеральных вод «Горячий пляж» проводились геофизические исследования под руководством А. Э. Голлербаха. Геологический разрез острова представлен неоген-четвертичными вулканогенно-осадочными породами, в составе которых широко распространены туфы, туффиты, лавы андезитов и андезито-базальтов. Современные четвертичные образования сложены рыхлыми аллювиальными-делювиальными и вулканогенными породами, широко развиты гидротермальноизмененные породы. Месторождение «Горячий пляж» расположено вблизи вулкана Менделеева и приурочено к крупной зоне дробления, пересекающей остров

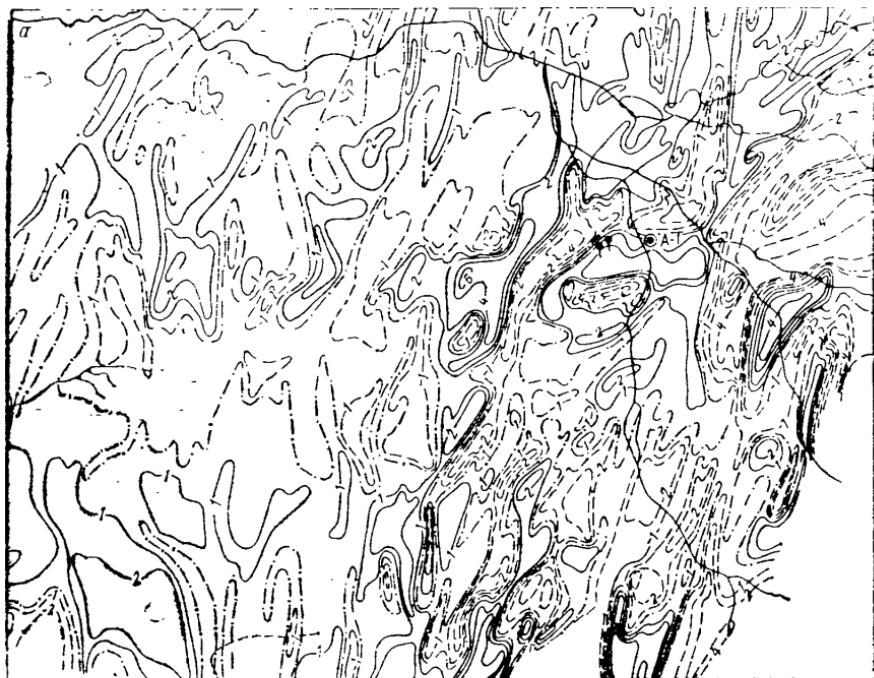
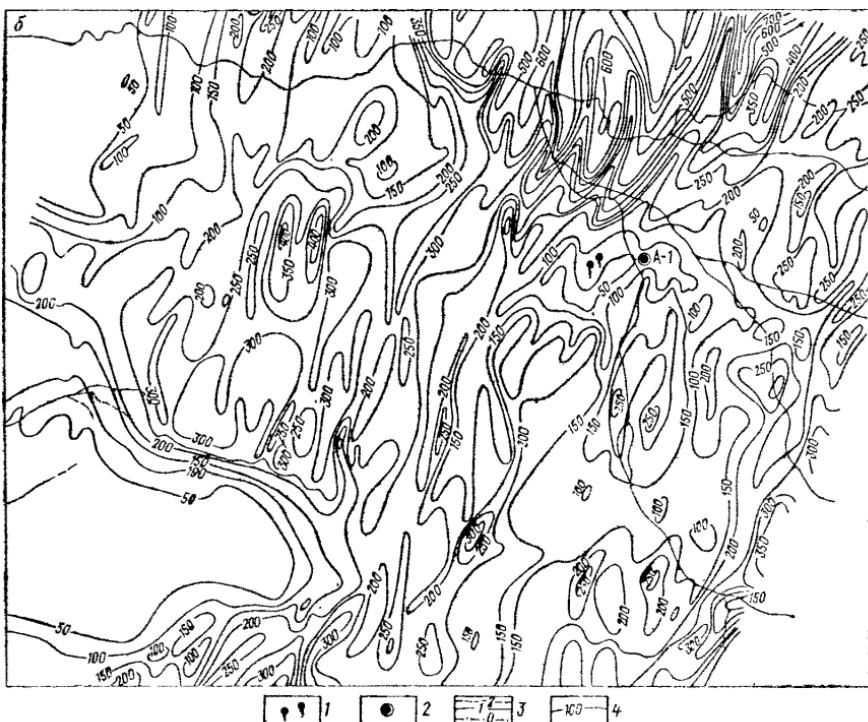


Рис. 18. Результаты магнито- и электроразведочных работ на участке «Горячие а — карта изодипов ΔZ ; б — карта изомов ρ_k по данным электропрофилирования с раз ρ_k , Ом·м

в его средней части. В районе предполагается наличие древних разломов с серней оперяющими трещинами. Считают, что выход термоминеральных вод на поверхность связан с оперяющими трещинами. Выделяют два горизонта подземных вод: грунтовые пресные холодные воды в верхней части разреза четвертичных отложений, термоминеральные трещинные и трещинно-жильные воды неогеновых вулканогенных пород. Водопроницаемость последних крайне низкая, циркуляция термоминеральных вод происходит в основном по системе тектонических трещин. В верх-

них интервалах разреза отмечаются термы с минерализацией 1,5—5,6 г/л. На глубинах 400—760 м вскрыты воды более высокой минерализации — до 26 г/л; это хлоридные натриево-кальциевые термы [43]. Термоминеральные воды месторождения «Горячий пляж» могут быть использованы как в энергетических, так и бальнеологических целях.

Задача геофизических исследований заключалась в выявлении локальных зон повышенной трещиноватости, являющихся главным носителем термоминеральных вод. Площадь геофизических исследований — 9,2 км², масштаб 1 : 10 000. Стадия ис-



Ключи в районе Апачинской депрессии (по И. М. Зайцеву, 1971 г.).
носами $AB=700$ м; 1 — горячие источники; 2 — скв. А-1; 3 — изодинамы ΔZ , м; 4 — изоомы

следований — предварительная разведка. Использованы различные модификации электроразведки — ВЭЗ, КВЭЗ, ЕП, МТЗ (табл. 8). Ранее А. Э. Голлербахом на той же площади использовались те же методы (а также магниторазведка) в масштабе 1 : 25 000. Вследствие несовершенства интерпретации исследования оказались малоэффективными.

Сведения о физических свойствах пород района, по данным исследований 1964—1971 гг., сводятся к следующему. Удельное

Таблица 8

Метод	Площадь исследований, км ²	Сеть наблюдений, м	Примечание
ВЭЗ и КВЭЗ $AB_{\max} = 1,5$ км	9,2	200×100	Количество точек КВЭЗ—примерно 20% от общего объема ВЭЗ
ЕП	0,3	100×20	—
МЗТ	—	Использован в отдельных пунктах	—

электрическое сопротивление самых верхних горизонтов четвертичных отложений обычно высокое — оно измеряется сотнями и тысячами ом-метров. Значительно ниже сопротивления эфузивно-осадочных пород: туфов — 1—10 Ом·м базальтов — 10—30 Ом·м, туфоалевролитов — 15—40 Ом·м, липаритов — 30—40 Ом·м, туфов глыбово-агломератовых андезито-базальтовых — 50—200 Ом·м. Сопротивление пород зависит от водобильности, минерализации подземных вод и степени их прогрева. В зонах активного водопаропроявления сопротивление пород меняется от единиц до долей ом-метров. Снижение сопротивления пород вдоль зон разломов служит четким поисковым признаком на термоминеральные воды. Эфузивно-осадочные породы района магнитны. Их магнитная восприимчивость довольно резко изменяется по площади и разрезу, что создает весьма сложные магнитные поля.

При интерпретации геофизических данных основное внимание уделено методу ВЭЗ, поскольку остальные оказались малоэффективными вследствие недостаточной глубинности либо из-за большой чувствительности к искажающим факторам. Геоэлектрический разрез представлялся в виде серии полого залегающих горизонтов с закономерно снижающимися по вертикали сопротивлениями. Нижний горизонт, имеющий сопротивление в несколько ом-метров, связывался с толщей пород, нацело переработанной гидротермальными процессами и содержащей термальные воды (рис. 19).

Распространение низкоомного горизонта отмечалось по всей территории, а термальные проявления «Горячего пляжа» объяснялись подтоком вод из этого горизонта. Генезис гидротерм «Горячего пляжа» увязывался с воздействием вулкана Менделеева. Исследования 1971 г. позволили локализовать перспективные участки на ограниченных площадях. Успеху интерпретации способствовало использование методики обработки кривых ВЭЗ по способу нормированных разностей, предложенному М. А. Киричек [75]. Метод этот особенно эффективен при изуче-

нии слабодифференцированного разреза, когда требуется выявить локальные неоднородности на фоне общих региональных характеристик. Основа метода заключается в вычислении осредненных для какой-то площади кривых ВЭЗ и определении отклонений в значениях кажущихся сопротивлений (при фиксированных разносах) AB на конкретных кривых ВЭЗ от соответствующих сопротивлений осредненных кривых. А. Э. Голлербах справедливо исходил из того, что сопротивление однородного вулканогенного разреза (вне зон тектонических нарушений) должно отличаться постепенным уменьшением с глубиной до какого-то предела, обусловленного затуханием трещиноватости пород. Монотонное убывание сопротивления связано с нарастанием температуры пород и повышением минерализации насыщающих и термоминеральных вод. Вследствие этого используемая в настоящее время количественная интерпретация, основанная на скачкообразном изменении электрического сопротивления на границе различных горизонтов, по мнению А. Э. Голлербаха, невозможна, так как дает фиктивные результаты.

Методика нормированных разностей позволяет выделить две составляющие величины кажущегося сопротивления r_k : обусловленную региональной зависимостью r_k от глубины и вызванную неоднородностью поля в горизонтальном направлении. Последняя объясняется остаточной или локальной аномалией $r_{k\text{н}}$ и ее появление может быть связано с особенностями геологического строения участка. Резкое снижение аномалий r_k связано с наличием зон разломов, глубокой переработкой пород в этих зонах и циркуляцией по ним термоминеральных вод. Величину средних сопротивлений r_k автор обозначает $r_{k\text{ср}}$, а локальных аномалий — $r_{k\text{н}}$ (величины нормированных сопротивлений в процентах значения $r_{k\text{н}}$ могут быть как положительными, так и отрицательными). На рис. 19 показаны карты и разрезы средних и нормированных сопротивлений. По геофизической информации удалось проследить широкую полосу, в пределах которой четко выделяются отдельные перспективные участки. Они хорошо увязываются с известными термопроявлениями на поверхности и данными бурения. Намечена серия разломов, взаимное пересечение которых определяет особо перспективные участки. В качестве примера интерпретации на рис. 19 приводятся результаты по профилю XXV; показаны не только зоны разломов, но и их наклон. Удалось также четко ограничить с юга перспективную на тремоминеральную воду площадь. Здесь отмечается резкое возрастание сопротивлений пород r_k , одновременно, судя по отдельным скважинам, резко меняются температура, минерализация и дебит исследуемых подземных вод. А. Э. Голлербах связывает границу с прохождением здесь крупного широтного нарушения, являющегося экраном, препятствующим проникновению термоминеральных вод в южном направлении.

В целом, геофизические работы позволяют правильно орга-

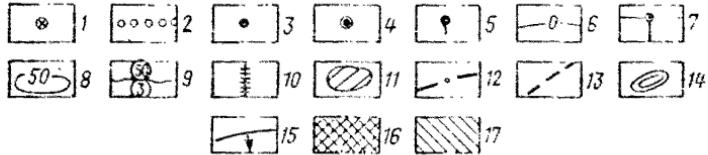
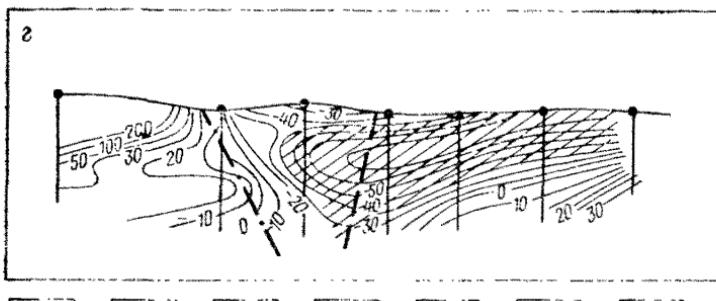
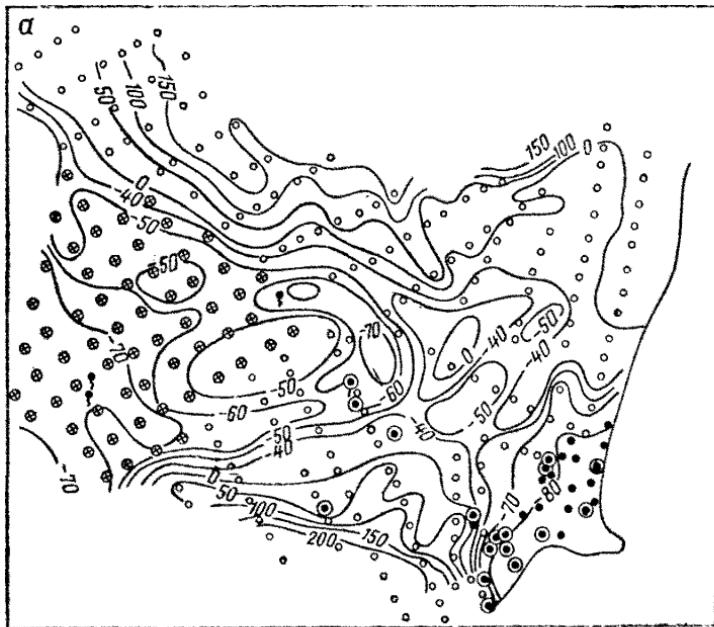
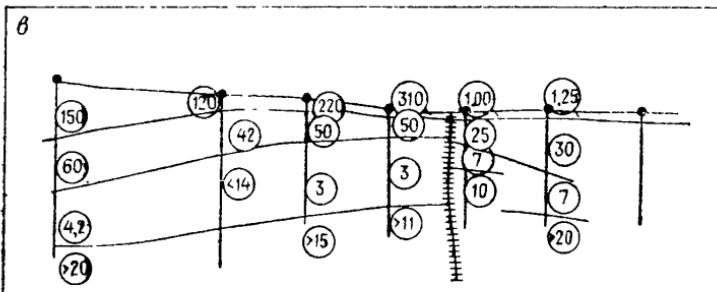
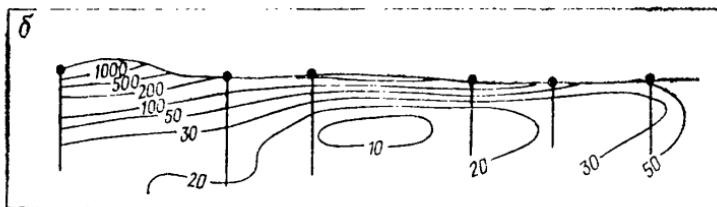


Рис. 19. Результаты электроразведки в районе месторождения «Горячий пляж»
 а — карта нормированных кажущихся сопротивлений $\rho_{кн}$ для интервала разносов XXV, построенный в результате палеочистой интерпретации в 1964 г.; б — геоэлектрический разрез нормированных сопротивлений $\rho_{кн}$ по профилю XXV по результатам изучения 1971 г.; 1 — точки КВ93, 2 — точки ВЭЗ; 3 — точки ВЭЗ 1964 г.; 4 — буровые скважины, $\rho_{кн}$, %; 7 — точки ВЭЗ на разрезе; 8 — линии кажущихся сопротивлений на разрезе, Ом·м; 10 — предполагаемые нарушения; 11 — предполагаемая область развития 13 — предполагаемая ось водоносной трещины; 14 — рекомендуемые первоочередные с элементами залегания; 16 — области максимальных температур и водообильности,



(по данным А. Э. Голлербаха, 1972 г.).

4В 2- 220-500 м; б - вертикальный разрез кажущихся сопротивлений ρ_k по профилю с. Сын, разрез по профилю, построенный в результате палеоточечной интерпретации, г - верхняя геопрепарации 1971 г., д - карта основных результатов геофизических работ; наблюдениями; 5 - источники термальных вод; б - изолинии величины нормированного сопротивления ρ_k , Ом·м; 9 - геоэлектрические горизонты и их удельное электрическое сопротивление высокотермальных вод (на разрезе); 12 - предполагаемое экранирующее нарушение; участки бурения скважин; 15 - положение тектонических трещин на глубине 150-200 м; 17 - области распространения термальных (перегретых) вод.

инизовать дальнейшие гидрогеологические работы. А. Э. Голлербахом доказана высокая эффективность электроразведки даже в сложных геолого-гидрогеологических условиях при творческом нестандартном подходе к интерпретации. В то же время представляется нецелесообразным при изучении месторождений типа «Горячий пляж» ограничиваться лишь одним методом ВЭЗ. На рассматриваемом объекте не выявлены до конца разведочные возможности магниторазведки. Видимо, проведенная в 1962 г. магнитная съемка не достаточно детальна. Применение магнитных съемок масштаба 1 : 5 000 — 1 : 10 000 при повышенной точности наблюдений, по всей вероятности, даст положительные результаты. Также желательно применять, хотя бы в небольших объемах, сейсморазведку КМПВ.

Месторождения со сложными условиями циркуляции минеральных вод. В толщах флишевых слабометаморфизованных отложений подземные воды, в том числе и минеральные, циркулируют как по зонам разломов, так и отчасти по проницаемым пластам, сложенным песчаниками и известняками. В результате образуется сложная водонапорная система с трещинно-жильными, порово-пластовыми и трещинно-пластовыми коллекторами, по которым идут вертикальная и горизонтальная циркуляции подземных вод. Эта система обладает свойствами трещинных массивов и межгорных артезианских бассейнов.

Флишевые толщи по составу и геофизическим параметрам весьма разнородны. Это осложняет прослеживание зон разломов. Наличие крупных складок и известная уплотненность пород мешают выделению в разрезе основных стратиграфо-литологических комплексов с помощью структурных методов — ВЭЗ и особенно КМПВ. Несмотря на указанные затруднения, представляется целесообразным использовать геофизические методы по двум основным направлениям, осуществляя: геолого-гидрогеологическое картирование коренных пород под покровом четвертичных образований и глубинную структурную разведку с выделением крупных тектонических элементов.

Геолого-гидрогеологическое картирование поверхностной части разреза заключается в прослеживании в плане определенных четких маркирующих горизонтов (плотных песчаников, известняков, пластов базальта и т. п.), выявлении зон разломов, оценке мощности рыхлых пород, перекрывающих коренные, и т. п. Эти задачи решаются в основном на поисковой стадии работ, они же более детально — на стадии предварительной разведки. Дополнительно на последней стадии могут быть обнаружены и прослежены зоны разгрузки минеральных вод, определены углы падения пород, установлены направления и скорость фильтрации грунтовых вод, их уровень и др.

Основной метод геологического картирования на стадии поисков — электропрофилирование, а при наличии магнитоактивных пород — магниторазведка, дополняемые ВЭЗ, иногда

КВЭЗ. При предварительной разведке этот комплекс может быть еще дополнен методом ЕП, термометрией, эманационной съемкой, резистивиметрией (в полевом варианте). На стадии поисков работы ведутся с густотой сети наблюдений, обеспечивающей результативный масштаб построений 1 : 25 000 — 1 : 50 000, на стадии предварительной разведки — 1 : 5 000 — 1 : 10 000. В связи с малой мощностью прослеживаемых при картировании горизонтов шаг наблюдений в 5—10, иногда 20 раз меньше расстояний между профилями.

Глубокая структурная разведка может быть выполнена, когда флишевые отложения в разрезе сменяются породами, резко отличающимися от них по своим геофизическим параметрам. Так, наличие карбонатных пород значительной мощности, подстилающих флиш, часто является благоприятным фактором для геофизической разведки, позволяя методом ВЭЗ выявить карбонатные породы и оценить мощность перекрывающих их флишевых образований. Возможно также, что когда в ядрах антиклиналей внедрены магматические породы, последние могут быть зафиксированы гравимагнитной съемкой. Важно отметить, что зачастую интенсивно трещиноватые магматические тела способствуют выходу на поверхность глубинных минеральных вод. Поскольку грави- и магниторазведкой почти повсеместно уже изучена территория горно-складчатых сооружений, в полевых условиях требуется использовать лишь метод ВЭЗ (привлекая готовые материалы грави- и магниторазведки для комплексной интерпретации). Зондирования могут быть выполнены на стадии как поисков, так и предварительной разведки. Сложные горные условия ограничивают глубину таких исследований 300—500 м. По опыту применения различных геофизических работ в аналогичных условиях, исследования необходимо проводить по достаточно густой сети наблюдений, на стадии поисков 1,5—0,5×0,5 — 0,25 км, на стадии разведки — примерно вдвое гуще. Площадь таких исследований на стадии поисков обычно не превышает 100 км², на стадии разведки составляет лишь несколько квадратных километров.

Использование геофизических материалов при изучении месторождений со сложными условиями циркуляции минеральных вод рассмотрим на примере района Боржоми (Малый Кавказ) и на ряде мелких курортов в Закарпатье.

В 1954 г. на площади курорта Боржоми и прилегающих к нему площадях проведены комплексные наземные и скважинные геофизические работы под руководством Ю. В. Бессоновой. Исследования носили опытно-производственный характер. Курорт Боржоми расположен в осевой полосе одноименной широтной антиклинальной складки, которая сложена мощными флишевыми отложениями палеоценового возраста, представляющими собой частое чередование мергелей и песчаников, и пронизана пластовыми и секущими жилами диабазов и диабазовых порфирий.

тов. Глубина залегания подошвы флиша в своде складки, по геологическим данным, составляет не менее 500 м. Флишевая толща залегает на карбонатных породах.

Крылья антиклинали сложены мощной туфогенной толщей эоценового возраста. Складка асимметрична: северное крыло ее пологое, южное — крутое. Породы в ядре антиклинали интенсивно трещиноваты, здесь проходит серия разломов. Среди разломов наиболее молодыми являются диагональные. По сбросовым трещинам в ядре антиклинали поднимаются минеральные воды. Благоприятным для их разгрузки является участок антиклинали, где ядро эродировано долинами рек Куры, Боржоми и Гуджаретис-Цхали. Пресные воды циркулируют в аллювии рек и по трещинам коренных пород. Их минерализация составляет 0,2—0,3 г/л, температура — 8—11°C. Минеральные воды представлены тремя группами. В туфогенных породах циркулируют субтермальные воды с минерализацией до 0,5 г/л и температурой не выше 32°C. Углекислодигрокарбонатные хлоридные воды (типа Ессентуки) приурочены к флишевой толще; их минерализация достигает 9 г/л, содержание свободной CO_2 — до 1,5 г/л, температура 12°C. К третьей группе относятся углекислодигрокарбонатные воды Боржомских и Цагверских источников; это артезианские пластово-трещинные воды с минерализацией 4,5—6,3 г/л, содержание свободной углекислоты — до 2,0 г/л, температура +20—32°C.

Задача геофизических исследований сводилась к выявлению и прослеживанию участков неглубокого залегания минеральных вод в долинах названных выше рек. Использован комплекс геофизических методов, включающих электроразведку (ВЭЗ, КЭП, ЕП, резистивиметрию) и магниторазведку. Общий объем исследований (в точках): ВЭЗ—535, КЭП—2055, ЕП—25127, резистивиметрии — 3628, магниторазведки — 2431. Площадь детальных исследований по методам ВЭЗ, КЭП, ЕП и магниторазведки составляет 5 км², их масштаб 1 : 5000 и детальнее. Работы по резистивиметрии выполнены в поисковом масштабе 1 : 50 000 и охватывают площадь в 160 км².

По данным параметрических замеров установлены значения электрического удельного сопротивления и магнитной восприимчивости пород (табл. 9).

Метод ВЭЗ использован преимущественно при исследовании узких глубоко врезанных долин (шириной 20—40 м), когда возможна была лишь профильная съемка. Зондирования выполнены с разносами $AB_{\max} = 680$ м и шагом наблюдений 16—20 м. Успеху ВЭЗ способствовало резкое снижение сопротивления пород, рыхлых и коренных, в зоне циркуляции минеральных вод. Наиболее часто фиксируются кривые ВЭЗ, для которых

$$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4,$$

где ρ_1 и ρ_2 — сопротивления поверхностных отложений; ρ_3 —

Таблица 9

Состав пород и вод	Среднее удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Магнитная вос- принимчивость $\times 10^{-6}$ СГС (среднее значение)
Аллювий р. Боржоми на площади подтока минеральных вод	45	—
Аллювий, насыщенный пресной водой	280	—
Анделит	2100	155
Песчаники, мергели	197	16
Туфогенные породы	—	362
Диабазы и диабазовые порфиры	1000	82
Роговники	560	12
Мел, известняк	—	10
Вода речная	40—70	—
Вода минеральных источников	1,4—6	—

сопротивление пород, насыщенных минеральными водами; ρ_4 — сопротивление массивных коренных пород.

Там, где выклинивается горизонт с сопротивлением ρ_3 , проведена качественная интерпретация путем построения вертикальных разрезов ρ_k . На них зоны источников минеральных вод выделяются четкими вертикальными минимумами ρ_k .

Комбинированное электропрофилирование (КЭП) и магниторазведка использовались на одних и тех же площадях для картирования тектонических нарушений в осевой части Боржомской антиклинали (в условиях спокойного рельефа). Полуразносы питающих электродов в установке КЭП приняты в 100 и 220 м, сеть наблюдений 200×20 м. Магниторазведка проводилась по сети 100×20 м при средней погрешности наблюдений ± 6 гамм. На графиках электропрофилирования зоны трещиноватости, особенно с минерализованной водой, отличаются минимумами ρ_k ; зоны трещиноватости, заполненные диабазами и базальтами, фиксируются повышенными сопротивлениями ρ_k и максимумами магнитных аномалий.

Метод ЕП использован для фиксации участков разгрузки минеральных вод. Сеть наблюдений 10×10 и 5×5 м. Участки фильтрации минеральных вод из коренных пород отмечены слабыми положительными аномалиями — до 10 мВ. Наличие индустриальных помех резко ухудшило разведочные возможности метода.

Резистивиметрия проводилась на площади гидрогеологической съемки 1954—1955 гг., выполненной на площади курорта и окружающих его территорий. Измерялось удельное электрическое сопротивление воды открытых водоемов, вдоль русел рек и ручьев. Шаг наблюдений — 100, местами 250 м. Густота наблюдений обеспечивает масштаб 1 : 50 000. Замеры электрического сопротивления производились с июля по сентябрь в усло-

виях устойчивой погоды, когда не сказывалось влияние талых и дождевых вод. Установлено, что минерализация увеличивается при движении от истоков к устьям водотоков. Воды, имеющие повышенную минерализацию, встречены вблизи известных минеральных источников.

Результаты комплексных геофизических исследований в подавляющем большинстве случаев подтвердили известные геологические представления о курорте. Обнаруженные новые аномалии, по-видимому, связанные с неглубокой циркуляцией минеральных вод, не были проверены бурением. Тем самым практическая ценность геофизических работ была сведена к минимуму. Вообще следует отметить, что геофизические работы, отличающиеся малоглубинным характером, выполнены с большим опозданием. Если бы они были проведены намного ранее, их эффект был бы весьма существенным. Более того, в середине 50-х годов в связи с началом бурения глубоких скважин (до 1000—1200 м) в районе г. Боржоми целесообразнее было бы организовать глубинные геофизические исследования, используя площадную гравиметрию и магнитометрию совместно с отработкой отдельных маршрутов ВЭЗ с большими разносами АВ. Это способствовало бы правильному заложению глубоких скважин и установлению контуров месторождения, не выявленного до последнего времени [17].

Другим примером является серия геофизических работ в Карпатской складчатой области. Неоген-четвертичные породы здесь представлены терригенными и эфузивно-туфогенными образованиями, мел-палеогеновые — мощными филишевыми толщами, преимущественно терригенного состава в палеогене и карбонатно-терригенного — в мелу. В разрезе встречаются также интрузивные породы. Область отличается обилием минеральных вод, особенно углекислых. Минеральные воды приурочены в основном к зонам разломов. Зачастую мощными коллекторами минеральных вод на глубине служат трещиноватые отторженцы известняков, залегающие среди терригенных пород.

Геофизические работы в Карпатской складчатой области при поисках и разведке минеральных вод начаты с середины 50-х годов под руководством Н. Н. Кабина, В. Е. Карбовича и др. [38]. Исследованы участки в районе Драгово, Рахово, санатория «Синяк» и др. Задачи геофизических исследований в этом регионе на поисковом этапе заключаются в геологическом картировании коренных пород под маломощным покровом четвертичных образований, прослеживании зон крупных разломов, изучении складчатой тектоники основных структур и оконтуривании участков для последующих более детальных работ.

Задача предварительной разведки заключается в детальном прослеживании зон разломов с выявлением участков, где разгружаются минеральные воды. Параллельно с этими исследованиями ведется геологическое картирование флишевой толщи,

Таблица 10

Породы	Удельное электрическое сопротивление пород различного возраста, Ом·м		
	Антропоген	Эоцен—неоген	Мел
Терригенные			
Валунно-галечниковые отложения	600—1900	—	—
То же, с песчано-глинистым или глинистым заполнителем	20—100 65	— 15—60 20 20—90 50	— — — — —
Глины и аргиллиты	—	— — — — —	— — — — —
Аргиллиты	—	— — — — —	— — — — —
Алевролиты	—	— — — — —	— — — — —
Переслаивание аргиллитов, алевролитов и песчаников	—	— — — — —	40—100 — — — —
Песчаники	—	— — — — —	— — — — —
Песчаники, гравелиты	—	— — — — —	— — — — —
Гравелиты	—	— — — — —	— — — — —
Конгломераты	—	— — — — —	200—5000 — — — —
Туфогенные			
Туфы	—	— — — — —	— — — — —
Туффиты	—	— — — — —	— — — — —
Брекчия из обломков туфов, песчаников	—	— — — — —	— — — — —
Карбонатные			
Мергели	—	— — — — —	35—140 — — — —
Переслаивание мергелей с песчаником	—	— — — — —	120—300 — — — —
Известняки	—	— — — — —	— — — — —
Магматические			
Гранит-порфиры	—	— — — — —	— — — — —
Анdezиты	—	— — — — —	— — — — —
Диорит-порфиры	—	— — — — —	— — — — —
Базальты	—	— — — — —	— — — — —
Липариты	—	— — — — —	— — — — —
Анdezито-базальты	—	— — — — —	— — — — —

П р и м е ч а н и е. В числителе приводится интервал изменения удельного сопротивления, в знаменателе — его среднее значение.

Таблица 11

Методы и основные показатели исследований	Характеристика показателей на стадии	
	поисков	предварительной разведки
Площадь исследований, км ²	Несколько сотен	5—10—15
Масштаб съемок	1:50 000, реже 1:25 000	1:10 000, реже 1:5 000
Метод ВЭЗ: назначение	Картирование крупных тектонических элементов, определение глубины и контуров карбонатных отторженцев	Определение глубин и контуров карбонатных отторженцев
AB _{max} , км сеть наблюдений	1—6 Отдельные маршруты 100—250 м и более	1—6 с шагом наблюдений
Метод ЭП: назначение	Картирование коренных отложений, выявление крупных разломов СЭП, реже КЭП	Детальное картирование коренных отложений, прослеживание разломов КЭП, ДЭП, реже СЭП
схемы наблюдений размеры установки AB (204, 00'), м сеть наблюдений, м	Примущественно 100—200 (250—500) × (25—50— 100), чаще 500 × 50	(50—100) × (25—40), чаще 100 × 25
Метод ЕП назначение	Выявление участков разгрузки минеральных вод (в основном на этапе детальных исследований) 250 × 25	(50—100) × 25, иногда шаг-5
Магниторазведка назначение	Картирование магматогенных пород 500 × 50	—
сеть наблюдений, м		—

а также определяются контуры распространения известняков J_1 — K_2 сп с оценкой глубин до их поверхности. Для решения перечисленных задач используется электроразведка постоянным током в различных модификациях (ВЭЗ, СЭП, КЭП, ДЭП, ЕП) и реже — магниторазведка. Физические параметры и соотношение мощностей изучаемых пород в общем благоприятствуют применению этих методов. В табл. 10 приведены сводные данные об электрическом сопротивлении пород в районе исследованных месторождений минеральных вод. Если же породы насыщают минеральные воды, сопротивление их снижается в 2—

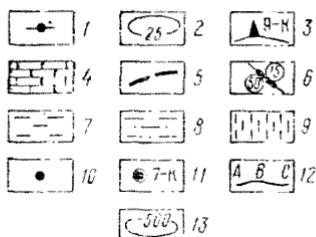
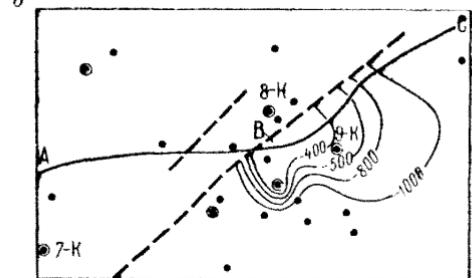
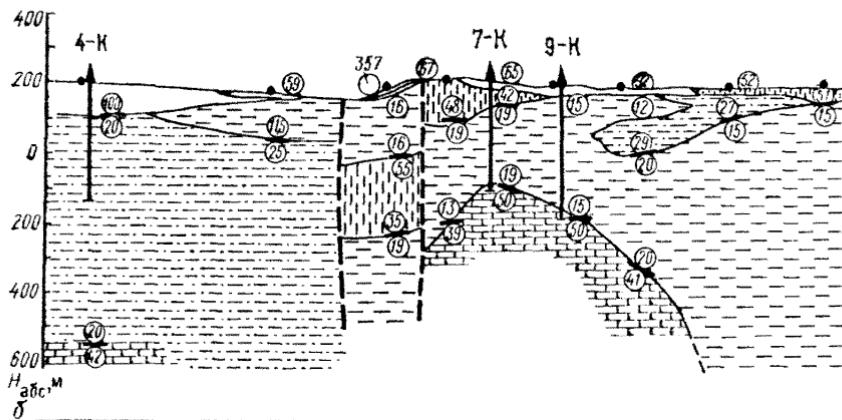
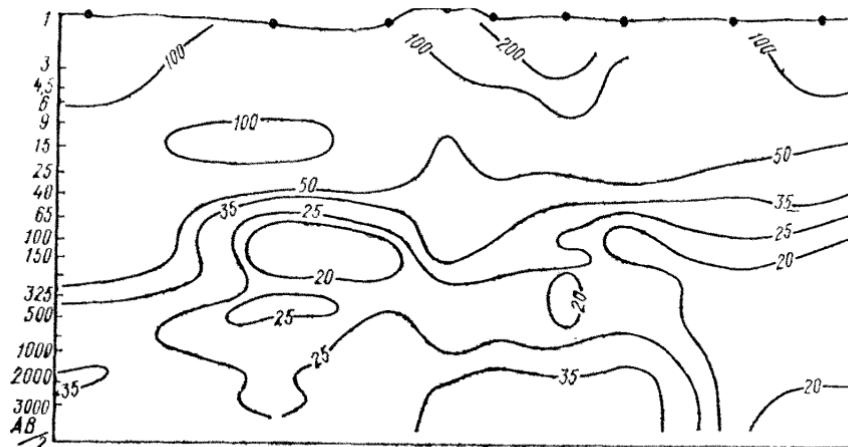


Рис. 20. Результаты геофизических исследований на участке «Карпаты» (по Н. Н. Кабашу, 1971 г.).

а — разрез изометрии по линии АВС и геоэлектрический разрез по линии АВС; б — карта участка с результатами электроразведки; 1 — пункты ВЭЗ на разрезах; 2 — изометрии $\rho_{\text{к}}$, Ом·м; 3 — скважины гидрогеологические и их номера; 4 — толщи карбонатных пород среди терригенных отложений; 5 — тектонические нарушения; 6 — электрическое сопротивление пород, Ом·м, и границы геоэлектрических горизонтов по ВЭЗ; сопротивления геоэлектрических горизонтов, Ом·м: 7—10—20, 8—20—35, 9—35—60; 10 — пункты ВЭЗ на карте; 11 — буровые скважины на карте и их номера; 12 — линии геоэлектрических разрезов; 13 — изогипсы кровли известняков мелового возраста, м.

3 раза и более. Также в несколько раз уменьшается сопротивление пород в зонах трещиноватости. Магнитные свойства пород изучены недостаточно. Известно, что базальты отличаются высокой магнитной восприимчивостью и создают магнитные аномалии интенсивностью в несколько сотен гамм.

В табл. 11 дается характеристика основных показателей методики геофизических работ на поисковой и разведочной стадиях исследований.

В целом геофизическая разведка решает поставленные задачи. Зоны разломов обычно выделяются минимумами сопротивлений. Они также фиксируются методом ЕП, если по ним происходит разгрузка подземных вод. Интерпретация этого метода, однако, не однозначна, поскольку отмечаются как фильтрационные и диффузионные потенциалы, связанные с разгрузкой минеральных вод, так и фильтрационные потенциалы, обусловленные инфильтрацией поверхностных вод и в значительной мере зависящие от рельефа местности. Важно также выявление мощных коллекторов подземных вод — известняковых отторженцев среди терригенных пород. Их верхняя часть с пресными водами хорошо отмечается по ВЭЗ высокими сопротивлениями (рис. 20). В то же время нижняя часть, насыщенная минерализованными водами, фиксируется как низкоомная зона. Геофизический прогноз подтвержден бурением скважин. Имеется серия скважин, пробуренных в зоне намеченных по геофизическим данным разломов и давших минеральную воду; также подтверждаются данные об известняковых отторженцах — о их контурах и глубине залегания (Н. Н. Кабин, 1971 г.).

Скважинные геофизические методы

В пределах месторождений минеральных вод трещинных массивов, щитов и горно-складчатых сооружений наиболее сложно с помощью геофизики изучать трещинные и закарстованные кристаллические породы (изверженные и метаморфические).

Исследование метаморфических пород осадочного комплекса в общем случае можно проводить по методикам, аналогичным с рассмотренными выше для соответствующих групп коллекторов (см. разделы III, IV). Основные трудности их изучения связаны с решением геолого-структурных задач. При анализе каротажных материалов необходимо более полно использовать накопленные ранее для данной или сопредельных площадей результаты всей геолого-геофизической информации по бурению скважин на воду, руду и другие полезные ископаемые.

Вулканические породы обладают широким диапазоном коллекторских свойств: туфы и туффиты характеризуются высокой пористостью, но низкой водопроницаемостью, сваренные туфы обладают пористостью от средней до низкой и весьма низкой

водопроницаемостью, этот параметр для базальта и андезита значителен и имеет очень высокие значения, но отбор воды из них слишком сложен, гипабиссальные породы, образующие дайки, характеризуются низкими значениями пористости и водопроницаемости.

Геофизические методы исследования скважин в районах развития вулканических пород, где основные скопления вод приурочены к трещинным зонам раздробленности или выщелачивания, которые при малом числе скважин на месторождениях по каротажу устанавливаются неопределенно, имеют ограниченные возможности и прежде всего вследствие значительного влияния специфического термодинамического режима месторождения на физические свойства горных пород.

Достоверность оценки основных геолого-гидрогеологических параметров разреза по данным каротажных материалов существенным образом зависит от выбора методики интерпретации.

Примером творческого подхода не только к методике выполнения каротажа, но и к поискам способов интерпретации при комплексном привлечении других геолого-гидрогеологических и геофизических характеристик разреза могут служить работы Камчатского геологического управления при изучении месторождений высокотемпературных гидротерм (рис. 21) [25, 32, 64]. В ходе изучения месторождений впервые в стране разработана технология бурения и опробования пароводяных скважин, методика их исследования геофизическими методами.

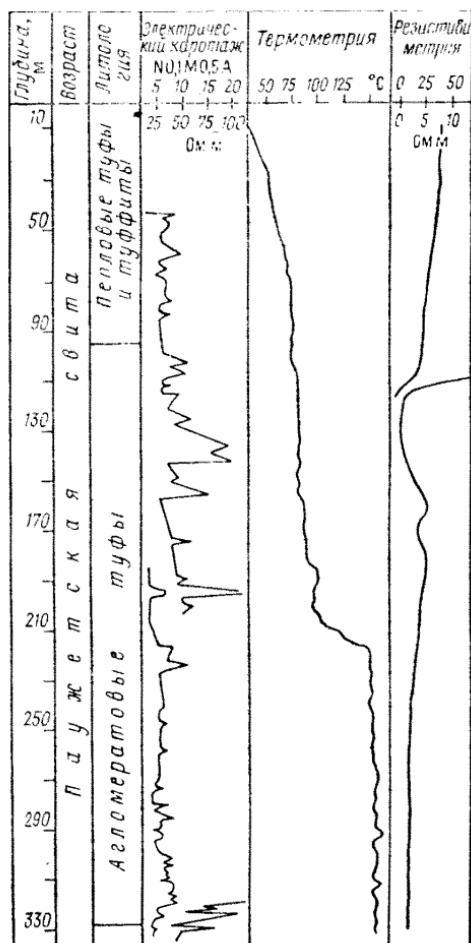


Рис. 21. Геолого-геофизический разрез скв. 15 Паугетского месторождения (по В. А. Сугробову)

Район сложен осадочно-вулканогенным комплексом пород, большая часть площади покрыта эфузивными и пирокластическими образованиями основного андезитового и дацитового составов. Осадочные породы — главным образом продукты разрушения лавового и туфового материалов и занимают пониженные формы рельефа. Восходящие потоки термальных вод приурочены к зонам тектонических нарушений различных направлений, наиболее распространенными коллекторами по характеру циркуляции являются трещинно-жильные и пластово-трещинные. При этом водообильность зависит от пористости и проницаемости толщи обводненных горных пород, которые в свою очередь определяются совокупностью многих факторов (см. раздел I).

Геофизические работы в скважинах этого типа месторождений производились серийной аппаратурой; при разработке методик учтены основные особенности разреза. Комплекс включал следующие геофизические исследования: КС, ПС, БКЗ, ГК, термометрию, резистивиметрию, кавернометрию, инклинометрию; широко привлекался керновый материал, по нарастанию дебита на устье скважины определялись места притока. Исследования выполнялись с целью литологического расчленения разреза и их корреляции в пределах месторождения, для определения зон притока термальных вод и выделения в разрезе зон высокой водопроницаемости, изучения геотемпературного поля и контроля технического состояния скважин.

Геологическое расчленение разреза проводилось на основании анализа всех геофизических кривых комплекса. На диаграммах стандартного каротажа резко выделяются все основные типы пород разреза. Поскольку сопротивление отложений определяется совокупностью многих факторов и прежде всего литологией, характером и степенью гидротермального метаморфизма, составом и минерализацией пластовых вод, трещиноватостью пород для правильной интерпретации при изучении разреза привлекались материалы кернового опробования. Результаты электропроводности по наиболее характерным типам пород представлены в табл. 12.

Для уточнения разреза широко использовались кривые гамма-каротажа. Отмечено, что наибольшую активность имеют кислые породы, наименьшую — основные. В зонах притоков вод наблюдается понижение γ -активности по сравнению с вмещающими породами аналогичного состава, что исследователи этого района связывают с увеличением диаметра скважины в зонах притока, с одной стороны, и с результатами выщелачивания ионов тяжелых радиоактивных элементов в процессе интенсивной деятельности термальных вод в течение длительного времени, с другой. Поскольку радиоактивность пород зависит от гидротермальной их изменчивости (повышенной γ -активностью отличаются породы, измененные до кварц-гидрослюдистых), с

Таблица 12

Порода	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Радиоактивность, мкР/ч
Туфопесчаники	20—200	3,8—4,2
Туфоалевролиты	8—20	4,2—4,6
Туфоконгломераты	10—80	4,8—5
Туфобрекчины	40—600	4,2—5
Туфоаргиллиты	2—10	4,6—5,8
Туфы, слабо гидротермально измененные	200—600	4—5,2
Туфы значительно гидротермально измененные	80—200	4,0—5,2
Туфы окварцованные	800—10000	5,2—6
Туфоловы	500—1500	4,2—5
Анdezиты слабо гидротермально измененные	1600—2570	5,2—12
Анdezиты гидротермальноизмененные	500—900	6,2—12
Анdezито-базальты гидротермальноизмененные	800—1600	2—2,2
Базальты гидротермально измененные	800—1200	2—4
Диориты	1500—4000	6,8—7,2
Дациты гидротермальноизмененные	400—1000	—
Порфириты	2000—7800	—

помощью метода ГК можно не только выявлять в разрезе интенсивно измененные породы, но и проводить литологическое расчленение. При изучении разреза используются данные кавернometрии: плотные ненарушенные породы выделяются номинальным диаметром, зона дробления и трещиноватости — иззубренностью участков, неустойчивые породы отмечаются кавернами. Основным критерием для выделения коллекторов служили также положительные аномалии на термограммах. Получение качественных термометрических замеров предусматривало специальную подготовку скважины (промывку ствола холодной водой с забоя через буровой инструмент или закачку холодной воды с устья).

Методика проведения термометрии и резистивиметрии для установления мест притока также существенно отличается от общепринятой и прежде всего в части предварительной длительной промывки скважин. Традиционные методы оттартывания и продавливания, учитывая специфику разреза, сводились к замерам параметров в различных условиях: при неизмененном положении уровня воды в скважине и притоке термальных вод. Измерения производились непрерывно при спуске или подъеме, записывались две-три кривые, что увеличивало достоверность результатов.

Определение истинных температур по стволу скважины с целью изучения геотемпературного поля производится после длительной выстойки скважин от нескольких суток до нескольких

месяцев при герметизированном устье. Материалы замеров использованы для построения карты геоизотерм и геотермических разрезов.

Задачи, поставленные перед промысловой геофизикой, решаются достаточно уверенно при комплексной интерпретации полученных данных. В низкотемпературных и малодебитных слоях разреза литологическое расчленение проводится довольно эффективно. Затруднение представляет выделение зоны гидротермально измененных пород по повышению γ -активности и диаметра скважины, зон дробления по снижению сопротивления, наличию каверн, зон интенсивной трещиноватости по пилообразным участкам кавернограммы, зон притока по уменьшению удельного сопротивления и увеличению температуры.

Рассмотренный пример свидетельствует о том, что правильное комплексирование методов закономерно приводит к положительным результатам, даже в сложных гидрогеологических условиях.

Приведенные в настоящей работе результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности геофизических методов при региональном прогнозировании, поисках и разведке месторождений минеральных вод. Геофизические работы дают положительные результаты лишь при тесной связи их с гидрогеологическими исследованиями. Успеху способствует своевременная постановка геофизических методов, правильная формулировка разведочных задач, обоснованно выбранный комплекс методов, использование результатов ранее проведенных геофизических исследований.

Предлагаемые рекомендации по типизации месторождений, выбору методов геофизики и приемов интерпретации являются лишь основой, на базе которой с учетом местных условий и личного опыта геофизики и гидрогеологи должны принимать самостоятельные решения. Невозможно заранее предусмотреть все особенности природных условий.

В работе показана целесообразность использования как малоглубинных наземных геофизических методов часть обеспечивающих прямое обнаружение месторождений минеральных вод, так и методов структурного направления, отличающихся значительной глубинностью. Несмотря на то, что эти методы дают косвенные решения, они позволяют выяснить важные вопросы, связанные с условиями формирования месторождений и последующим направлением их изучения. Среди применяемых методов особенное значение в настоящее время приобретает сейсморазведка — в этом залог резкого повышения эффективности всего комплекса геофизических работ.

Необходимым методом исследований является каротаж скважин, позволяющий получить максимум информации о разрезах скважин. Без каротажа при разведке минеральных вод вообще невозможно решение многих важных вопросов: уточнение геологического строения интервалов бурения, пройденных без выхода керна, непрерывная регистрация температуры и радиоактивности по стволу скважин, выявление перелива из одного горизонта в другой и т. п. Методы исследования скважин необходимы для правильной постановки полевых геофизических работ. Таким образом, наземные и скважинные геофизические наблюдения представляют собой неразрывный комплекс исследований.

Отмечается большая информативность материалов ранее проведенных геофизических исследований, ориентированных на изучение нефтяных, рудных и других месторождений полезных

ископаемых. Их использование позволяет осуществлять не только региональное прогнозирование, но и в некоторых случаях поиски месторождений минеральных вод.

Настоящая работа является первой попыткой систематизации сведений о методике геофизических исследований месторождений минеральных вод. Требуются дальнейшие исследования научных и производственных организаций, направленные на совершенствование методики полевых работ и приемов интерпретации. Вместе с широким внедрением сейсморазведки и использованием традиционных методов электроразведки необходимо привлекать термометрию, радиометрию, магнито- и гравиразведку, а также тщательно изучать физические свойства пород. Полезны региональные геофизические обобщения, при которых изучалась бы связь глубинного геологического строения и соответствующих геофизических аномалий с формированием месторождений минеральных вод. Необходимо совершенствование методики скважинных исследований и приемов интерпретации применительно к специфическим условиям месторождений минеральных вод, особенно при изучении жильных и трещинно-жильных коллекторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов А. Т. Вопросы теории и практики электроразведочных исследований мерзлых пород. — «Труды Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям». Т. 6, 1971, с. 6—76.
2. Беляевский Н. А. Земная кора в пределах территории СССР. М., «Недра», 1974. 280 с. с ил.
3. Богданова Л. Л., Ерастов Г. П. Опыт применения геофизических исследований при изучении гидрогеологических условий правобережья р. Нерчи. — В кн.: Методика, гидрогеологические исследования и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. М., «Наука», 1966, с. 100—106.
4. Боголюбов А. Н., Куницын Р. В., Сочеванов Н. Н. Применение комплекса геофизических методов при разведке минеральных вод Джеты-Огуз. — «Советская геология», 1964, № 10, с. 12—24 с ил.
5. Богословский В. А., Огильви А. А. О возможностях геофизических методов при изучении разгрузок пресных вод в прибрежных зонах морей. — «Водные ресурсы», 1973, № 1, с. 25—38, 178—185 с ил.
6. Бондаренко С. С. Методические указания по региональной оценке и картированию прогнозных эксплуатационных запасов подземных промышленных вод. М., изд. ВНИИГИГ. 1969. 134 с. с ил.
7. Боревский Б. В., Хордикайнен М. А., Язвин Л. С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М., «Недра», 1976. 247 с. с ил.
8. Борков В. С., Коншина Ю. П. Поиски и разведка месторождений строительных материалов геофизическим методом. М., «Недра», 1970. 150 с. с ил.
9. Брашинина И. А. Закономерности распространения карста в районе г. Дзержинска по данным геофизических исследований. — «Труды Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям». Т. 6, 1971, с. 178—248 с ил.
10. Бубнов В. Д. Результаты сейсморазведочных работ на Паратунском месторождении термальных вод. — В кн.: Применение геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. ВИЭМС, 1970, с. 56—62 с ил.
11. Вартанян Г. С. Особенности разгрузки напорных вод по тектоническим нарушениям в трещиноватых массивах. — «Бюл. МОИП, Сер. геология». Т. X. Вып. 4, 1966, с. 147—149.

12. Вартанян Г. С., Яроцкий Л. А. Поиски, разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений минеральных вод. М., «Недра», 1972. 127 с. с ил.
13. Вартанян Г. С. Поиски и разведка месторождений минеральных вод в трещинных массивах. М., «Недра», 1973. 96 с. с ил.
14. Водоватова З. А. Водопроницаемость и электропроводность песчано-глинистых пород в естественных термодинамических условиях. — В кн.: Вопросы оценки взаимосвязи поверхностных и подземных вод и качества воды. М., изд. МГУ, 1972, с. 255—266 с ил.
15. Геофизические исследования при крупномасштабных геологосъемочных работах. Алма-Ата, изд. МГ КазССР, 1970. 214 с. с ил. Авт.: Е. С. Гольденберг, В. Б. Македон, Н. Н. Костюкова.
16. Гершаник В. А. О распознавании мерзлых пород с помощью сейсмозразведки. — «Труды Государственного научно-исследовательского и проектного института», 1968, вып. 6, с. 71—80 с ил.
17. Гидрогеология СССР. Т. 45. М., «Недра», 1974. 201 с. с ил.
18. Горбушина Л. В., Зимин Д. Ф., Сердюкова А. С. Радиометрические и ядерно-геофизические методы поисков и разведки полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1970. 376 с. с ил.
19. Горяинов Н. Н. Сейсморазведка при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород (методические рекомендации). М., изд. ВНИИГиГ, 1971. 85 с. с ил.
20. Горяинов Н. Н. Применение методов сейсмоакустики для поисков месторождений трещинно-жильных вод. — «ЭИ ВИЭМС. Сер. Региональная, разведочная и промысловая геофизика», М., изд. МГ СССР, 1974, вып. 2, с. 5—8 с ил.
21. Гринbaum И. И. Расходометрия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. М., «Недра», 1975. 271 с. с ил.
22. Гуревич В. З., Наумкина В. Г. Применение статистических параметров для выявления зон повышенной трещиноватости известняков при поисках подземных вод. — В кн.: Использование геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., «Недра», 1975, с. 81—86 с ил.
23. Дахнов В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтенасыщения горных пород. М., «Недра», 1975. 344 с. с ил.
24. Дахнов В. Н., Дьяконов Д. И. Термические исследования скважин. М., Гостоптехиздат, 1952. 252 с. с ил.
25. Денисик В. А., Зайцев И. М. Некоторые результаты геофизических работ на Паратунском геотермальном месторождении. — «Геология и геофизика», 1971, № 7, с. 92—100 с ил.
26. Добровольский Л. А. Опыт проведения электроразведки для поисков подземных вод в сложных геологических условиях. — «Изв. вузов. Сер. Геология и разведка», 1964, № 12, с. 15—21 с ил.
27. Дублянский В. Н., Смольянников Б. М. Карстолого-геофизические

- кие исследования карстовых полостей Приднепровской Подолии и Подолья. Киев, «Наукова думка», 1969. 151 с. с ил.
28. Дучков А. Д., Моисеенко У. И. О возможности измерения геотермического градиента в неглубоких скважинах. — «Геология и геофизика», 1970, № 9, с. 83—87 с. с ил.
29. Елисеев Н. А. Метаморфизм. М., изд. ЛГУ, 1959. 415 с. с ил.
30. Еремеев А. Н., Ершов А. Д., Яницкий И. П. Некоторые аспекты гелиевой съемки при структурно-геологическом картировании и прогнозе эндогенного оруденения. — В кн.: Геохимические методы при поисках и разведке рудных месторождений. М., Изд-во АН СССР, с. 49—65 с. ил.
31. Зайцев И. М. О влиянии современных гидротерм на физические свойства горных пород. — В кн.: Вопросы геофизики. Л., изд. ЛГУ, 1971, с. 31—39 с ил.
32. Зайцев И. М. Об изучении гидрогеотермических условий месторождений термальных вод геофизическими методами. — В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М., «Наука», 1971, с. 265—270 с ил.
33. Изучение и использование геотермальных ресурсов. М., «Мир», 1975. 340 с.
34. Иванов В. В., Невраев Г. А. Классификация подземных минеральных вод. М., «Недра», 1964. 168 с. с ил. (ЦНИИКиФ. Труды. Вып. 1)
35. Ильина Е. Б. Статистическая обработка геоэлектрических измерений при инженерно-геологических изысканиях. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. М., МГУ, 1974. 21 с.
36. Кавказские минеральные воды. — «Труды Центрального научно-исследовательского института курортологии и физиотерапии». Т. 21. М., Изд-во АН СССР, 1972. 157 с. с ил.
37. Карнов Л. Д. Геологическая эффективность нефтегазовой электроразведки на Северном Сахалине. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. Л., ВНИГРИ, 1972. 21 с. с ил.
38. Кирик Е. В. Некоторые результаты геофизических исследований с целью поисков минеральных вод в Закарпатье. — «Труды 1-й конференции молодых геофизиков Украины». Киев, 1966, с. 51—56 с ил.
39. Комиссаров И. А., Давыдов А. Д. Применение электроразведки при гидрогеологических изысканиях в районах развития соленоносных отложений. — «Разведка недр», 1950, № 2, с. 37—44 с ил.
40. Кунин Н. Я. Комплексирование геофизических методов при геологических исследованиях. М., «Недра», 1974. 272 с. с ил.
41. Липская А. Э., Ряполова В. А. Применение метода вызванной поляризации при инженерно-геологических изысканиях. — В кн.: Применение геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. ВИЭМС, 1970, с. 30—37 с ил.
42. Маврицкий Б. Ф. Западно-Сибирский артезианский бассейн. — «Труды Лаборатории гидрогеологических проблем им. акад. Ф. П. Саваренского». Т. 39. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 5—150 с ил.

43. Маврицкий Б. Ф., Отман Н. С. Гидротермы Южных Курил и перспективы их использования. — В кн.: Месторождения промышленных термальных и минеральных вод. М., изд. ВНИИГиГ, 1974, с. 18—25 с ил.
44. Матвеев Б. К. Геофизические методы изучения движения подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1963. 133 с. с ил.
45. Мелькановицкий И. М. Об использовании гравиметрических наблюдений при гидрогеологических исследованиях. — В кн.: Использование геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. ВНИИГиГ, 1975, с. 39—48.
46. Мелькановицкий И. М. Региональные геофизические исследования гидрогеологических условий артезианских бассейнов. М., «Недра», 1975. 142 с. с ил.
47. Мелькановицкий И. М., Костромина Р. А. Геологическое картирование складчатого основания Приташкентской впадины. — «Труды Средне-Азиатского института геологии и минерального сырья», 1961, вып. 5, с. 119—125 с. с ил.
48. Методические рекомендации по картажу гидрогеологических скважин. М., «Недра», 1971, 191 с. с ил. Авт.: И. М. Гершанович, Г. Я. Черняк, М. Г. Гаврилов и др.
49. Методические указания по гидрогеологической съемке на закрытых территориях в масштабах 1 : 500 000, 1 : 200 000 и 1 : 50 000. М., «Недра», 1968. 166 с. с ил.
50. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. М., «Недра», 1972. 285 с. с ил.
51. Минеральные воды СССР. М., изд-во М-ва здравоохранения СССР, 1974. 324 с. с ил.
52. Нагутское месторождение минеральных вод. — «Советская геология», 1975, № 2, с. 92—107 с ил. Авт.: Г. Ф. Ковалевский, Б. И. Минкин, Г. В. Черняевский, Н. П. Терещенко.
53. Овчинников А. М. Минеральные воды. Изд. 2-е. М., Госгеолтехиздат, 1963. 376 с. с ил.
54. Овчинников А. М. Гидрохимия. М., «Недра», 1970. 200 с.
55. Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста. М., изд. МГУ, 1956, 161 с. с ил.
56. Огильви А. А. Геофизические методы исследований. М., изд. МГУ, 1962. 412 с. с ил.
57. Огильви А. Н. О гидрогеологических условиях происхождения Мацестинских минеральных источников и об их каптаже. — В кн.: Курорт Мацеста. М., Госмединдзат, 1928, с. 15—21 с ил.
58. Огильви А. Н. Термометрия как метод гидрогеологических исследований. Л.—М., Геоллитиздат, 1931. 32 с. с ил.
59. Огильви Н. А. К вопросу о радиоактивности цхалтубских минеральных вод. — «Труды Института курортологии Главкурурпра НКЗ Грузии ССР». Т. 2. 1938. с. 17—28 с ил.

60. Огильви Н. А. Вопросы теории геотемпературных полей в приложении к геотермическим методам разведки подземных вод. — В кн.: Проблемы геотермии и практического использования тепла Земли. Ч. 1. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 53—85 с ил.
61. Огильви Н. А. Физические и геологические поля в гидрогеологии. М., «Наука», 1974. 160 с. с ил.
62. Огильви Н. А., Семендеева Л. В. Гидродинамическая модель системы артезианских водоносных горизонтов по геофизической информации. — В кн.: Подземный сток и методы его исследования. М., «Наука», 1972, с. 88—100 с ил.
63. Островский Л. А., Фомин В. М. Подземные воды равнинной части Средней Азии. М., «Недра», 1969. 212 с. с ил.
64. Паужетские горячие воды на Камчатке. Под ред. Б. И. Пийпа. М., «Наука», 1965. 208 с. с ил.
65. Позин Э. П. Поиски и разведка трещинно-жильных вод геофизическими методами на территории Мурманской области. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. Л., ЛГИ, 1970. 13 с.
66. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения. Под ред. Н. Н. Биндемана. М., «Недра», 1969. 328 с. с ил.
67. Поляк Б. Г., Смирнов Я. Б. Связь глубинного теплового потока с тектоническим строением континентов. — «Геотектоника», 1968, № 4, с. 3—19 с ил.
68. Применение методов геофизики при изучении областей формирования стока в карбонатных отложениях артезианских бассейнов. — «Обзор ВИЭМС. Сер. Гидрогеология и инженерная геология». М., изд. ВИЭМС, 1969. 37 с. с ил. Авт.: В. А. Богословский, В. Н. Кожевникова, Э. Н. Кузьмина, А. А. Огильви.
69. Пузырев Н. Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М., Гостоптехиздат, 1959. 451 с. с ил.
70. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М., «Недра», 1969. 239 с. с ил. Авт.: А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин, З. Г. Ященко.
71. Селадина В. В. Гидрогеологические условия и гидроминеральные ресурсы курорта «Старая Русса». Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. Л., ЛГИ, 1975. 22 с.
72. Семенов Г. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. М., «Недра», 1968. 371 с. с ил.
73. Семенов Г. С. Геофизические исследования при поисках и разведке месторождений нерудных полезных ископаемых и подземных вод Среднего Поволжья. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. М., Казан. ГИ, 1974. 14 с.
74. Солодов Н. А. Альбитовые пегматиты и их генезис. — «Труды минералогического музея АН СССР», 1962, вып. 12. 180 с. с ил.
75. Способ нормированных производных для интерпретации материалов электроразведки в Западном Узбекистане, «ЭИ. Сер. Региональная, раз-

- ведочная и промысловая геофизика». М., изд. ВИЭМС, 1971, № 79. 9 с. с ил. Авт.: Н. Г. Зарипова, М. А. Киричек, И. Г. Кельпер, А. В. Киршин.
76. Суэтинов В. В. Геотермическая разведка методом вариации теплового потока. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра геол.-минер. наук. М., МГРИ, 1975. 41 с.
77. Токарев А. Н. Основные закономерности формирования природных радиоактивных вод. — В кн.: Закономерности формирования подземных вод. М., изд. ВНИИГиИГ, 1975, с. 16—25 с. с ил.
78. Урысон В. О., Егоров В. Д. Электрическая разведка минеральных вод в районе с. Большие Соли Ивановской области. — «Изв. Моск. геол. геодез. треста», 1935, с. 5—12 с ил.
79. Федынский В. В. Разведочная геофизика. М., «Недра», 1967. 672 с. с ил.
80. Федюк В. И. Микромагнитная съемка и ее геологические возможности. М., Госгеолтехиздат, 1958. 64 с. с ил.
81. Физические свойства пород осадочного покрова СССР. Под ред. М. Д. Озерской и В. Н. Подобы. М., «Недра», 1967. 772 с. с ил.
82. Фролов Н. М., Язвин Л. С. Поиски, разведка и оценка эксплуатационных запасов термальных вод. М., изд. ВНИИГиИГ, 1969. 176 с. с ил.
83. Чубаров В. Н. Питание грунтовых вод песчаной пустыни через зону аэрации. М., «Недра», 1972. 135 с. с ил.
84. Шилин Б. В., Гусев Н. А., Караженский Е. А. Об использовании инфракрасной аэросъемки при выявлении участков избыточного увлажнения и выходов подземных вод. — «Советская геология», 1971, № 1, с. 15—21 с ил.
85. Шкатункин В. Н. Многолетний режим температуры подземных вод Прибалтики. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минер. наук. М., ВНИИГиИГ, 1975. 20 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	3
I. ГИДРОГЕОЛОГИЯ ВАЖНЕЙШИХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД. Г. С. Вартанян	5
Общая характеристика и типизация месторождений минеральных вод	5
Особенности месторождений трещинно-жильного типа	11
II. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД.	23
Основы методики полевых геофизических исследований. И. М. Мелькановицкий	23
Комплексирование полевых геофизических методов и некоторые приемы интерпретации. И. М. Мелькановицкий	36
Скважинные геофизические методы. З. А. Водоватова	53
III. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ПЛАТФОРМЕННЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ	70
Полевые геофизические методы. И. М. Мелькановицкий	70
Скважинные геофизические методы. З. А. Водоватова	88
IV. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ПРЕДГОРНЫХ И МЕЖГОРНЫХ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ И СКЛОНОВ	93
Полевые геофизические методы. И. М. Мелькановицкий	93
Скважинные геофизические методы. З. А. Водоватова	108
V. ИЗУЧЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ТРЕЩИННЫХ МАССИВОВ И ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ	118
Полевые геофизические методы. И. М. Мелькановицкий	118
Скважинные геофизические методы. З. А. Водоватова	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	167

ИБ № 805

Илья Маркович Мелькановицкий, Генрих Сенекеримович Вартанян,
Зоя Александровна Водоватова

МЕТОДИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ
И РАЗВЕДКЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД

Редактор издательства *Т. А. Петрова* Техн. редакторы *Л. Я. Голова, Б. А. Ильсова*
Обложка художника *К. В. Голикова* Корректор *Л. А. Столярова*

Сдано в набор 20.12.78. Подписано в печать 18.04.79. Т-07844 Формат 60×90^{1/16}.
Бумага № 2. Гарнитура литер. Печать высокая. Печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 12,0
Тираж 2 100 экз. Заказ 1884/6054—3 Цена 60 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский просезд, д. 1/19.

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, К-51, Цветной бульвар, д. 26.