

И.М.МЕЛЬКАНОВИЦКИЙ,
В.А.РЯПОЛОВА,
М.А.ХОРДИКАЙНЕН

МЕТОДИКА
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ПОИСКАХ
И РАЗВЕДКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПРЕСНЫХ ВОД

И. М. МЕЛЬКАНОВИЦКИЙ,
В. А. РЯПОЛОВА,
М. А. ХОРДИКАЙНЕН

МЕТОДИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРЕСНЫХ ВОД

Под редакцией д-ра геол.-минер. наук
А. А. Огильви



МОСКВА «НЕДРА» 1982



18836

Огильви

Мелькановицкий И. М., Ряполова В. А., Хордикайнен М. А. Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод. Под ред. А. А. Огильви. М. Недра, 1982, 239 с.

В книге рассмотрены основы гидрогеологических поисков и разведки преимущественно крупных месторождений пресных подземных вод. Описана методика исследований в различных геолого-гидрологических и природных условиях, в том числе в Сибири, на Дальнем Востоке, в районе многолетней мерзлоты.

Даны рекомендации по выбору сети, масштаба, площади и глубины исследований, по комплексированию методов в зависимости от условий проведения работ и решаемых задач. Рассмотрена геолого-экономическая эффективность геофизических работ.

Книга предназначена для геофизиков и гидрогеологов, занимающихся вопросами поисков и разведки подземных вод. Она представляет также интерес для студентов вузов, специализирующихся в области геофизических и гидрогеологических исследований.

Табл. 20, ил. 30, список лит.— 47 назв.

Рецензент д-р геол.-минер. наук *Н. А. Огильви*
(ИВП АН СССР)

Предисловие

Роль геофизических методов в общем комплексе геологоразведочных работ возрастает из года в год. В настоящее время технический прогресс при гидрогеологических изысканиях не мыслим без широкого внедрения геофизических методов. На предприятиях Министерства геологии СССР достаточно широко используются скважинные методы исследований (картаж), но не во всех геологических организациях стали неотъемлемой частью поисков и разведки подземных вод наземные геофизические работы. Между тем, как показывает опыт, эти исследования при правильной квалифицированной постановке значительно повышают эффективность гидрогеологических изысканий, способствуют сокращению объема дорогостоящих работ, ускоряют темп разведки, делают исследования более полными и надежными.

На практике геофизические работы при гидрогеологических исследованиях имеют серьезные недостатки. Они зачастую носят несистематический характер, из возможных гидрогеологических задач решаются не все, комплекс методов ограничен, интерпретация ведется упрощенно, без строгих математических расчетов и т. п. Это в значительной мере ограничивает внедрение наземных методов в геологоразведочную практику.

Вопросы применения геофизических работ при поисках и разведке подземных вод освещены в ряде монографий [9, 16, 20, 22, 26]; по отдельным вопросам методики опубликовано большое число обзоров, статей. Среди последних особого внимания заслуживают исследования Н. Н. Шарапанова [32, 42, 43 и др.]. В предлагаемой работе рассматриваются особенности геофизических исследований известных типов месторождений подземных вод на всех этапах поисково-разведочных работ. В основу работы положены личный опыт авторов, результаты специальных тематических работ научно-исследовательских организаций (ВСЕГИНГЕО, МГУ, Гидропроекта, ЦНИИСа и др.), а также обширные данные производственных организаций МГ СССР.

Раздел 1 составлен М. А. Хордикайненом, разделы 2—6, 8—9 — И. М. Мелькановицким, раздел 7 — В. А. Ряполовой. Кроме того, в составлении разделов 5.2—5.4 принял участие В. Б. Пугач.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в работе над книгой А. А. Огильви, М. Н. Байсаровичу, О. В. Беляевой, Б. В. Боровскому, Н. Н. Горяинову, Н. Д. Лопаткиной, В. С. Матвееву, И. Я. Першину, А. А. Рыжову, Л. Г. Соколовскому, С. А. Шмарьяну, Л. С. Язвину.

1. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Водные ресурсы являются одним из важнейших факторов развития производительных сил. В связи с резким ростом потребления воды во многих районах земного шара, особенно в обжитых районах, поверхностные водные источники уже не в состоянии удовлетворить все возникающие потребности. Развитие промышленности, коммунального обслуживания населения, интенсификация сельскохозяйственного производства приводят в ряде случаев к ухудшению качества речных вод. Поэтому даже там, где их количество достаточно, они по своему санитарному состоянию или загрязнению микрокомпонентами или другими вредными веществами не всегда удовлетворяют требованиям не только хозяйственно-питьевого, но и технического водоснабжения. Эти причины обусловили быстрый рост разведки эксплуатационных запасов подземных вод и их использования в народном хозяйстве.

Из общего количества эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод в пределах территории СССР (около 10 100 м³/с) на 1/1 79 г. было разведано и утверждено в ГКЗ (ТКЗ) около 1550 м³/с, из которых около 920 м³/с по категориям А + Б.

В ведущей стране капиталистического мира — США по данным Совета по водным ресурсам при президенте страны потребление подземных вод в 1960 г. составляло 220 млн м³/сут, в 1970 г. — 278 млн. м³/сут, а в 1980 г. — 321,4 млн. м³/сут (М. Е. Половицкая, 1972 г.). Быстрый рост разведанности и использования эксплуатационных запасов подземных вод привел к такому положению, когда фонд легко открываемых и, что особенно важно, легко разведываемых месторождений подземных вод сокращается, и в дальнейшем гидрогеологам-разведчикам придется все в большей степени сталкиваться с месторождениями подземных вод, удаленными от потребителя, сложными для проведения разведочных работ и оценки их эксплуатационных запасов.

Поэтому в последние 10—15 лет постоянно развиваются и совершенствуются не только методика гидрогеологических поисковых и разведочных работ, но и комплексирование их с другими видами исследований — аэрокосмическими, ядерно-физическими и, в первую очередь, — геофизическими. В результате проведения комплекса поисково-разведочных работ проводится оценка эксплуатационных запасов подземных вод разведываемого месторождения. При оценке эксплуатационных запасов подземных вод определяются их количество, качество и условия эксплуатации. Эксплуатационные запасы подземных вод могут

обеспечиваться естественными (емкостными) запасами, в том числе и упругими; естественными ресурсами эксплуатируемого водоносного горизонта; привлекаемыми естественными ресурсами и запасами других водоносных горизонтов; транзитным поверхностным стоком; искусственным восполнением подземных вод.

Под естественными запасами понимается объем гравитационной воды, заключенной в порах и трещинах водовмещающих пород. В напорных горизонтах к естественным запасам относят также упругие, под которыми подразумевается объем воды, высвобождаемый из пласта при понижении пластового давления. Под естественными ресурсами понимается величина питания водоносного горизонта в ненарушенных условиях. Естественные ресурсы равны сумме всех приходных элементов баланса данного горизонта (инфильтрация атмосферных осадков, поглощение поверхностного стока или перетекание из смежных горизонтов в ненарушенных условиях и т. д.). Под привлекаемыми ресурсами и запасами подземных вод понимаются дополнительные количества воды, поступающие к водозабору под влиянием перераспределения напоров при его эксплуатации. Сюда относятся: прекращение транспирации растительностью и испарения с почвы, возникновение или усиление перетекания, поглощения транзитного поверхностного стока и т. д.

Геофизические исследования, выполняемые для решения тех или иных гидрогеологических задач, связанных с разведкой месторождений пресных подземных вод и оценкой их эксплуатационных запасов, занимают значительное место в общем комплексе разведочных работ, позволяют получить на ранних стадиях исследований довольно большой объем информации без применения или с применением лишь в небольших объемах тяжелых дорогостоящих видов работ (бурение, откачки). Специалист этого профиля, работающий в области гидрогеологии, в частности разведки месторождений подземных вод, должен четко представлять себе задачи, стоящие не только перед геофизическими работами, но и общие гидрогеологические задачи, без чего невозможно целеустремленное, методически правильное применение и собственно геофизических методов.

1.1. ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Если потребности в воде тех или иных объектов народного хозяйства удовлетворяются за счет подземных вод, к ним следует подходить как к полезному ископаемому. Следовательно, приходится говорить о «месторождении подземных вод» (здесь и далее будут подразумеваться только пресные воды). Н. И. Плотников (1959 г.) под месторождением подземных вод понимал естественное накопление подземных вод в благоприят-

ных геолого-литологических и геоморфологических водовмещающих структурах. Он убедительно обосновал правомерность и практическую необходимость использования термина «месторождение подземных вод» для систематизации результатов разведок подземных вод, совершенствования методики поисков, разведки и оценки запасов подземных вод в различных природных условиях. В последние годы вопросы типизации месторождений подземных вод разрабатывали Л. С. Язвин и Б. В. Боровский [45]. С учетом высказывавшейся критики прежних определений понятия «месторождения подземных вод» ими было сформулировано следующее определение термина «месторождение подземных вод», являющееся в настоящее время общепринятым: месторождениями подземных вод называются участки водоносных горизонтов или комплексов, в пределах которых под влиянием естественных или искусственных факторов создаются благоприятные условия для отбора подземных вод определенного состава (отвечающего установленным условиям) в количестве, достаточном для экономического целесообразного их использования. Та часть месторождения, где производится эксплуатация подземных вод, называется эксплуатационным участком или участком водозабора. Принципиальным отличием приведенного определения от предлагавшихся ранее является то, что вместо участков «скопления», «условий накопления» подземных вод рассматриваются участки, в пределах которых создаются условия для отбора подземных вод.

Л. С. Язвиним и Б. В. Боровским на основе анализа геолого-гидрогеологических условий, определяющих масштаб месторождения подземных вод и методику проведения геологоразведочных работ и оценки эксплуатационных запасов, разработана типизация месторождений пресных и слабосоленых подземных вод, используемых для водоснабжения и орошения. Ими выделяются следующие основные типы месторождений: 1) в речных долинах; 2) в артезианских бассейнах платформенного типа; 3) в конусах выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин; 4) ограниченных по площади структур или массивов трещинных и трещинно-карстовых пород и зон тектонических нарушений; 5) подземных вод песчаных массивов; 6) подземных вод межморенных флювиогляциальных отложений; 7) подземных вод в области развития многолетнемерзлых пород.

Для многих из выделенных типов месторождений подземных вод Л. С. Язвиним и Б. В. Боровским предложены более детальные классификации (например, Б. В. Боровским [6] для четвертого типа месторождений), основанные на анализе источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, в отличие от общей классификации, которая также, как и классификация Н. И. Плотникова, проводится по геоструктурному признаку.

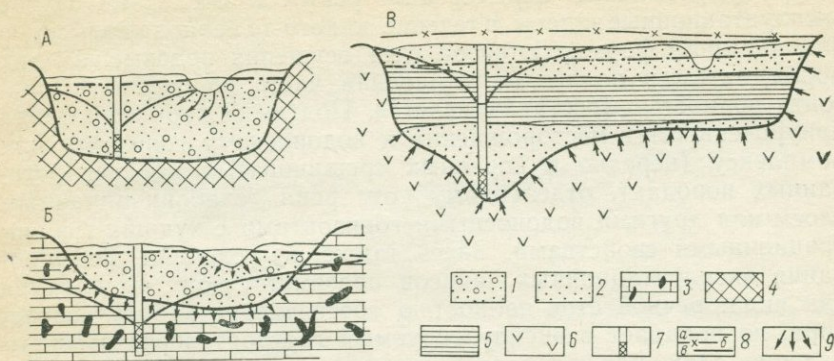


Рис. 1. Схема месторождений подземных вод в речных долинах, подтипы А, Б, В.

1 — песчано-гравийно-галечниковые отложения; 2 — пески; 3 — карстовые известняки; 4 — непроницаемые отложения; 5 — глины; 6 — эффузивы; 7 — скважины с фильтрами; 8 — уровень подземных вод; а — грунтовых, б — напорных в ненарушенных условиях, в — уровень подземных вод, эксплуатируемого водоносного горизонта; 9 — направление фильтрации поверхностных вод в водоносный горизонт при его эксплуатации.

С нашей точки зрения, вслед Г. Н. Каменскому (1947 г.), выделившему девять типов водовмещающих структур, было бы целесообразно классификацию Л. С. Язвина и Б. В. Боровского дополнить еще одним типом месторождений подземных вод — лавовыми покровами, которые нередко занимают большие пространства, содержат значительные количества подземных вод и характеризуются некоторыми специфическими приемами поисков, разведки и оценки запасов подземных вод.

Месторождения подземных вод в речных долинах (рис. 1). К этому типу месторождений относится большое количество месторождений подземных вод, приуроченных к аллювиальным отложениям. Водоносные породы представлены песками, гравием, галечниками, имеющими нередко довольно значительную мощность — 50—70 м. Иногда объектом разведки может служить и водоносный горизонт коренных пород, если он прорезается рекой или если эксплуатационные запасы подземных вод, формирующиеся при работе водозабора, будут обеспечиваться притоком к нему речных вод. Согласно Н. И. Плотникову [26] от 50 до 60 % всех разведываемых запасов пресных подземных вод сосредоточено в речных долинах. По строению разреза долины и источникам формирования запасов подземных вод этот тип месторождений подразделяется на два подтипа [45]. Подтип А — водоносный комплекс непосредственно связан с руслом реки. В этом случае выделяются два вида месторождений: эксплуатационные запасы полностью обеспечиваются поверхностным стоком реки; в меженный период или в течение цикла маловодных лет поверхностный сток не обеспечивает эксплуатационный отбор или же полностью отсут-

ствует (пересыхание, перемерзание реки). В последнем случае эксплуатационные запасы в течение какого-то периода полностью или частично формируются за счет осушения водовмещающих пород, затем в половодье осушенная часть водоносного горизонта полностью восстанавливается. Подтип *Б* характеризуется приуроченностью месторождения к водоносному горизонту или комплексу (нередко в коренных трещиноватых или закарстованных породах), отделенному от реки слабопроницаемым слоем или другими водоносными горизонтами с худшими фильтрационными свойствами. Здесь также по условиям формирования эксплуатационных запасов подземных вод выделяются два вида: речной сток полностью обеспечивает работу водозабора, но попадает в эксплуатируемый горизонт через перекрывающие слои или слабопроницаемые отложения; в какие-то периоды речной сток не обеспечивает эксплуатационный отбор полностью или же прекращается вовсе, в это время эксплуатационные запасы подземных вод полностью или частично формируются за счет осушения аллювиальных или других перекрывающих отложений. В паводок происходит полное или частичное восполнение сработанных запасов при заливе поймы или процессах берегового регулирования.

В качестве отдельного подтипа (подтип *В*) могут рассматриваться древние погребенные долины, в обнаружении которых геофизические методы наряду с изучением геоморфологических особенностей играют ведущую роль. Эксплуатационные запасы подземных вод погребенных долин формируются в основном за счет сработки упругих запасов при снятии напоров. Приток из боковых пород, частичное осушение водоносного горизонта, перетекание из перекрывающих слоев имеют подчиненное значение.

Месторождения подземных вод в артезианских бассейнах платформенного типа (рис. 2). Этот тип месторождений широко распространен, составляет 20—30 % от общего числа разведываемых месторождений [46] и играет важную роль в водобеспечении народного хозяйства, в особенности в европейской части страны, в Западной Сибири и других регионах. Здесь можно выделить два подтипа месторождений подземных вод [28]. Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в месторождениях, расположенных в центральных частях артезианских бассейнов, являются сработка упругих запасов или же перетекание через слабопроницаемые разделяющие слои. Чаще всего наблюдается совместное действие этих двух факторов. Другим подтипом являются месторождения подземных вод в краевых частях артезианских бассейнов платформенного типа. Здесь водовмещающие породы нередко выходят на земную поверхность или залегают неглубоко. Источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод являются естественные ресурсы подзем-

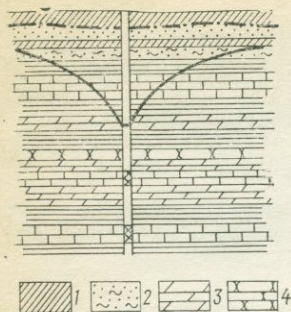


Рис. 2. Схема месторождения подземных вод в артезианском бассейне.

1 — суглинки; 2 — пески глинистые; 3 — мергели; 4 — песчаники; остальные условные обозначения см. на рис. 1

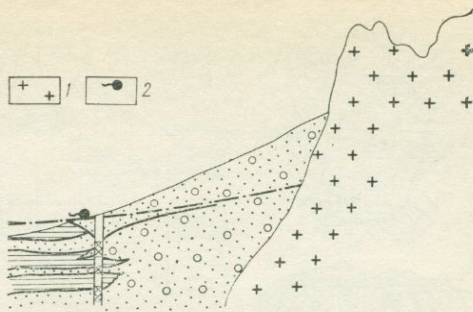


Рис. 3. Схема месторождения подземных вод в конусе выноса.

1 — граниты; 2 — разгрузка подземных вод в зоне выклинивания в ненарушенных условиях; остальные условные обозначения см. на рис. 1

ных вод, формирующиеся в районе водозаборов, в ненарушенных условиях разгружающиеся в зоне влияния водозабора; поглощение поверхностного стока; перетекание из перекрывающих пород и их осушение; сработка упругих запасов.

Месторождения в конусах выноса, предгорных шлейфах и межгорных впадинах (рис. 3). В этом типе месторождений основным источником формирования эксплуатационных запасов подземных вод являются их естественные ресурсы, расходуемые на испарение, и родниковый сток, формирующийся в зоне выклинивания. Иногда существенное значение приобретает дополнительное привлечение поверхностного стока при понижении уровня подземных вод (главным образом в зоне выклинивания), а при устройстве водозаборов в нижней части месторождения (ниже зоны выклинивания) — сработка упругих запасов и перетекание через слабопроницаемые разделяющие прослои и гидрогеологические окна. Если в районе водозабора развито орошаемое земледелие, значительную роль в формировании эксплуатационных запасов подземных вод могут играть возвратные фильтрующиеся в водоносный горизонт оросительные воды.

Месторождения ограниченных по площади структур или массивов трещинных и трещинно-карстовых пород и зон тектонических нарушений (рис. 4). Этот тип месторождений не занимает важного места в общем объеме гидрогеологических разведочных работ и в общем числе разведываемых месторождений, однако значение его очень велико там, где подобные месторождения подземных вод нередко являются единственным источником получения воды, в частности в аридной и полуаридной зонах. Подробная классификация этого типа месторождений разработана Б. В. Боровским [6]. По характеру источников формирования запасов подземных вод он выделяет два подтипа место-

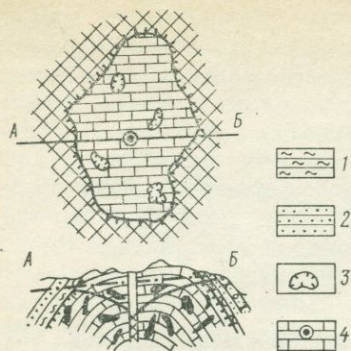


Рис. 4. Схема месторождения подземных вод ограниченных по площади структур или массивов трещинных и трещинно-карстовых пород.

1 — алевролиты; 2 — аргиллиты; 3 — карстовые воронки; 4 — скважины; остальные условные обозначения см. на рис. 1

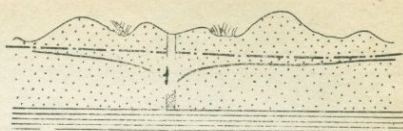


Рис. 5. Схема месторождения подземных вод песчаных массивов (условные обозначения см. на рис. 1)

рождений: связанных и не связанных с поверхностными водотоками, действующими постоянно или периодически. На месторождениях, не связанных с поверхностными водотоками, основными факторами формирования запасов подземных вод являются осушение водоносного пласта, использование формирующихся на площади месторождения естественных ресурсов, поскольку рассматриваемые месторождения характеризуются обычно небольшой площадью — десятки и первые сотни квадратных километров; в таких условиях влияние водозаборов достигает границ пласта, охватывая очаги разгрузки подземных вод, сокращая или полностью прекращая испарение и транспирацию растительности. В месторождениях, связанных с постоянно или периодически действующими поверхностными водотоками, источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод в общем аналогичны месторождениям в речных долинах, т. е. главным источником формирования запасов является поверхностный сток. В этом случае, если постоянно или часть года речной сток меньше производительности водозабора, происходит осушение пласта, использование формирующихся на площади месторождения естественных ресурсов, как правило, разгружающихся в долине реки; в паводок сработанные запасы эксплуатируемого водоносного горизонта полностью или частично восполняются.

Месторождения подземных вод песчаных массивов (рис. 5). К этому типу месторождений относится следующий ряд подтипов: месторождения подземных вод в эоловых песках пустынь и полупустынь; месторождения подземных вод задровых равнин; линзы пресных вод, «плавающих» на соленых, в засушливых районах Прикаспия и Средней Азии. В месторождениях

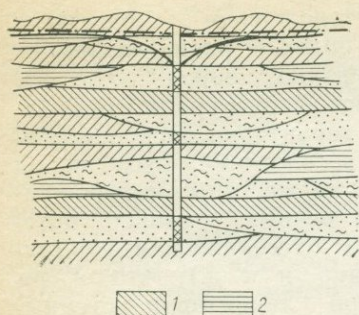


Рис. 6. Схема месторождения подземных вод межморенных флювиогляциальных отложений.

1 — морена; 2 — глины; остальные обозначения см. на рис. 1 и 2

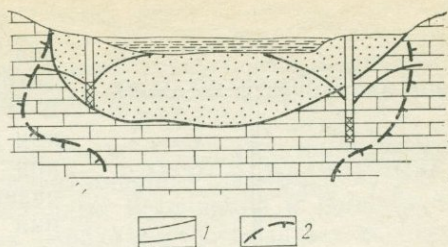


Рис. 7. Месторождения подземных вод в области развития многолетнемерзлых пород (сквозной подоцерный талик).

1 — поверхностный водоём; 2 — граница мерзлых пород (по В. Д. Гродзенскому); остальные условные обозначения см. на рис. 1

первого подтипа источником формирования запасов подземных вод является в основном осушение пласта, а естественные ресурсы, формирующиеся в пределах эоловых массивов, имеют подчиненное значение. В месторождениях песчаных массивов зандровых равнин основным источником формирования эксплуатационных запасов подземных вод являются их естественные ресурсы, обусловленные довольно интенсивным питанием атмосферными осадками при благоприятных условиях инфильтрации. Осушение песчаных массивов в этом подтипе месторождений существенной роли не играет. Говоря о линзах пресных вод, «плавающих» среди соленых вод, можно выделить два вида их: крупные линзы предположительно реликтового происхождения, например в Каракумах и Западно-Туркменской низменности, эксплуатационные запасы которых практически полностью формируются за счет осушения песков; небольшие линзы, распространенные в Прикаспийской низменности, или подтакрыные линзы Туркмении, формирование которых связано с местными микро- и мезоусловиями питания. При эксплуатации подземных вод таких линз значение имеют не только осушение песков, но и формирующиеся естественные ресурсы подземных вод.

Месторождения подземных вод межморенных флювиогляциальных отложений (рис. 6). Месторождения подземных вод в межморенных флювиогляциальных отложениях развиты в северной и северо-западной частях ЕТС. Они характеризуются, как правило, неглубоким залеганием, невыдержанностью водоносных горизонтов, слабопроницаемых слоев и их резкой фациальной неоднородностью, этажным строением разреза. Все это, наряду с гумидностью климата, большим количеством атмосферных осадков и невысокими среднегодовыми температурами, обуславливает пестроту и многообразие источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

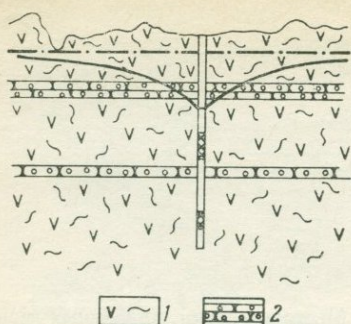


Рис. 8. Схема месторождения подземных вод лавовых покровов.

1 — трещиноватые ноздреватые эффузивные породы; 2 — конгломераты

ных вод, приемов разведки и заставляет выделить такие месторождения подземных вод в особый тип. В последние годы вопросами методики поисков и разведки подземных вод, оценки их эксплуатационных запасов и типизацией месторождений подземных вод в области развития многолетнемерзлых пород занимался В. Д. Гродзенский [46]. По геолого-гидрогеологическим геокриологическим условиям им выделены следующие типы месторождений подземных вод в мерзлой зоне: месторождения подземных вод в таликовых зонах речных долин, подозерных и подаласных таликах; месторождения подмерзлотных вод в артезианских бассейнах платформенного типа и в межгорных артезианских бассейнах; месторождения подземных вод в трещинных и трещинно-карстовых породах зон тектонических нарушений. Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в зоне развития многолетней мерзлоты являются: поверхностный сток (за исключением периода перемерзания рек) и естественные ресурсы подземных вод. Сработка упругих и естественных запасов имеет сугубо подчиненное значение (за исключением подмерзлотных вод в артезианских бассейнах платформенного типа, но там подмерзлотные воды часто характеризуются низким качеством и непригодны для водоснабжения).

Месторождения подземных вод лавовых покровов (рис. 8).

На особенности геоструктурного характера нахождения подземных вод в эффузивных образованиях впервые обратил внимание Г. Н. Каменский (1947 г.), выделивший в качестве самостоятельного типа «водных месторождений» подземные воды лавовых покровов. Этот тип месторождений распространен мало, но в отдельных районах (Армения, Дальний Восток) является доминирующим. Поскольку подземные воды в эффузивных породах характеризуются высокой динамичностью, образуя мощные потоки, основным источником формирования эксплуатаци-

Месторождения подземных вод в области развития многолетнемерзлых пород (рис. 7). В геолого-структурном отношении на территории распространения многолетнемерзлых пород развиты те же типы месторождений (в речных долинах, артезианских бассейнах платформенного типа и т. д.), что и на остальной территории страны, но наличие многолетней мерзлоты обуславливает специфику гидрогеологических условий, источников формирования эксплуатационных запасов подзем-

онных запасов является привлечение естественных ресурсов, разгружающихся в зоне влияния водозабора. Иногда существенное значение имеет поглощение поверхностного стока; сработка емкостных запасов и осушение пласта имеют подчиненное значение.

Из изложенного выше видно, что в различных типах месторождений подземных вод эксплуатационные запасы подземных вод формируются за счет различных источников и роль этих источников неодинакова. Хотя необходимо стремиться к тому, чтобы наиболее надежно и достоверно в процессе разведочных работ определять именно основные, важнейшие факторы (источники) формирования эксплуатационных запасов, на практике это не всегда удается, и нередко приходится сталкиваться с неодинаковой достоверностью определения источников формирования запасов подземных вод. Более того, основные факторы могут быть определены менее надежно, чем второстепенные (например, поглощение поверхностного стока и привлечение разгружающихся в долину естественных ресурсов подземных вод). Все это обуславливает неодинаковую достоверность подсчета эксплуатационных запасов подземных вод в целом. На достоверность оценки эксплуатационных запасов оказывает влияние и фильтрационная неоднородность водоносных пород. Л. С. Язвин (1972 г.) по степени неоднородности фильтрационных свойств разбил водовмещающие породы на три группы: условно однородные, неоднородные, весьма неоднородные. В качестве критерия отнесения коллекторов к той или иной группе Л. С. Язвин предложил величину среднего квадратичного отклонения логарифма их водопроводимости $\sigma_{lg km}$: условно однородные породы имеют среднее квадратичное отклонение логарифма водопроводимости до 0,2, неоднородные — 0,2—0,4 и весьма неоднородные — более 0,4.

К первой группе относятся обычно песчано-гравийные рыхлые отложения речных долин, эоловых и зандровых равнин, скальные породы с равномерной трещиноватостью и простыми условиями залегания; ко второй группе — скальные породы, характеризующиеся неравномерной трещиноватостью, рыхлые неоднородные валунно-гравийно-галечниковые отложения с разнородным заполнителем, нередко — флювиогляциальные отложения с резкой фациальной изменчивостью; к третьей группе — главным образом скальные породы, характеризующиеся крайне неравномерной трещиноватостью и закарстованностью. Породы третьей группы характерны для складчатых областей и кристаллических щитов.

По гидрохимическим условиям также выделяются три группы месторождений: с простыми, сложными и весьма сложными гидрохимическими условиями [45]. Простые условия наблюдаются там, где отсутствуют предпосылки к изменению (ухудшению) качества воды в течение всего времени работы

водозабора или же границы распространения некондиционных вод имеют простую форму, а водоносные горизонты приурочены к равномерно проницаемым рыхлым зернистым породам. В этом случае прогноз изменения качества подземных вод на весь период работы водозабора довольно надежно устанавливается расчетным путем. Сложными гидрохимическими условиями характеризуются месторождения, где границы распространения некондиционных вод имеют сложную форму, а водовмещающие породы характеризуются неравномерной проницаемостью. В этом случае прогноз изменения качества воды на весь период эксплуатации устанавливается расчетным путем лишь приближенно. Наконец, к третьей группе — с весьма сложными гидрохимическими условиями — относятся месторождения, где границы зон с некондиционными водами в плане и разрезе имеют сложный характер, а водовмещающие породы характеризуются крайней неравномерностью фильтрационных свойств («весьма неоднородные» по классификации Л. С. Язвина). В таких условиях прогноз качества воды не поддается даже приближенному расчету и возможные изменения качества воды в процессе эксплуатации устанавливаются ориентировочно на основе анализа общих гидрогеологических условий месторождения.

Инструкцией ГКЗ СССР для выработки общих принципов методики разведки и унификации требований к составу и объемам разведочных работ месторождения подземных вод в зависимости от комплекса гидрогеологических условий и степени их сложности разделены на три группы. К первой группе относятся месторождения с простыми гидрогеологическими условиями: подземные воды приурочены к спокойно залегающим пластам выдержанной мощности, представленным однородными (пористыми или равномерно трещиноватыми) породами. В процессе разведочных работ можно надежно изучить источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод и дать обоснованный прогноз изменения качества подземных вод (или его неизменности) в процессе эксплуатации. Ко второй группе относятся месторождения подземных вод со сложными гидрогеологическими условиями: подземные воды приурочены к относительно спокойно залегающим слоям с невыдержанной мощностью и фациальной изменчивостью или неоднородным по фильтрационным свойствам (неравномерно трещиноватым и закарстованным). Часть источников формирования запасов в процессе разведочных работ устанавливается надежно, часть — лишь приближенно. Прогноз изменения качества воды на период эксплуатации можно дать ориентировочно расчетным путем. К третьей группе относятся месторождения подземных вод с очень сложными гидрогеологическими условиями. Подземные воды приурочены к весьма неоднородным по фильтрационным свойствам (резко неравномерная трещиноватость и закарстованность) коллекторам, имеющим локальное распространение

или невыдержанным по мощности, интенсивно дислоцированным и осложненным разрывными нарушениями. Источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод в процессе разведочных работ можно изучить ориентировочно, а изменение качества воды прогнозировать приближенно.

Характерными примерами месторождений первой группы являются речные долины с непосредственной связью эксплуатируемого горизонта с речными водами и обеспеченным питанием за счет поверхностных или разгружающихся в долине естественных ресурсов; артезианские бассейны платформенного типа с однородными фильтрационными свойствами водоносных горизонтов; месторождения в конусах выноса и межгорных впадинах, а также песчаных массивах при простой конфигурации границ вод разной минерализации. Примерами месторождений второй группы являются месторождения в речных долинах типа Б с периодическим стоком или же погребенные древние долины; месторождения в краевых частях артезианских бассейнов с весьма неоднородными фильтрационными свойствами водовмещающих пород; месторождения в ограниченных по площади структурах или массивах трещинных и трещинно-карстовых пород, связанных с реками; месторождения флювиогляциальных отложений и песчаных массивов со сложными гидрохимическими условиями. К месторождениям третьей группы относятся ограниченные по площади структуры и массивы трещиноватых и закарстованных пород и зоны тектонических нарушений, не связанные с реками; месторождения в краевых частях артезианских бассейнов при весьма неравномерных фильтрационных свойствах водовмещающих пород и неясно выраженных источниках формирования эксплуатационных запасов; подавляющая часть месторождений подземных вод в зоне развития многолетнемерзлых пород.

Краткое изложение типизации месторождений пресных подземных вод по геоструктурным признакам, источникам формирования эксплуатационных запасов подземных вод, их гидрохимическим условиям и степени фильтрационной неоднородности водовмещающих пород показывает сложность задач, стоящих перед гидрогеологом, приступающим к поискам, разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод. И здесь геофизические методы, примененные в рациональном комплексе и надлежащих объемах, оказывают гидрогеологам существенную, иногда неоценимую помощь.

1.2. СТАДИИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для рационального и планомерного выявления ресурсов и запасов пресных подземных вод, а также во избежание неоправданных затрат на проведение поисково-разведочных работ

с излишней детальностью или на объектах, не отвечающих целевому заданию, все геологоразведочные работы на пресные подземные воды проводятся в несколько стадий, отличающихся друг от друга назначением, содержанием и результатами работ: 1) гидрогеологическая съемка масштаба 1:200 000; 2) поиски; 3) предварительная разведка; 4) детальная разведка; 5) эксплуатационная разведка.

Содержание и объемы работ на каждой стадии зависят от их целевого назначения, потребности в воде и особенностей гидрогеологических условий (типа) месторождения подземных вод. В зависимости от степени изученности, сложности гидрогеологических условий и потребности в воде отдельные стадии исследований могут быть объединены или полностью исключены. Работы, проводимые на каждой стадии, должны давать материал (результаты), соответствующий этой стадии, и служить основой для составления проекта работ последующей стадии. Именно с этих позиций гидрогеологи подходят к выбору способов и методов разведки подземных вод при изучении различных типов месторождений на разных стадиях. Перед геологом, проводящим разведочные работы, всегда стоит задача — нахождение оптимального выхода из диалектического противоречия между получением максимальной информации и затратой минимального количества средств. Это и определяет применение тех или иных видов работ и их объемов на различных стадиях исследований. Вопрос о выборе методов разведки месторождений подземных вод на различных ее стадиях и объемов работ должен решаться в зависимости от условий в каждом конкретном случае отдельно. Общих рекомендаций здесь давать нельзя, и этот сложный вопрос нельзя исчерпывающим образом осветить в методических рекомендациях, инструкциях и т. д., в то время, как методика проведения отдельных видов работ на каждой стадии определяется соответствующими инструкциями и методическими указаниями.

Гидрогеологическая съемка масштаба 1:200 000. Такая съемка проводится для планомерного гидрогеологического изучения территории СССР. Основным назначением работ этой стадии является выяснение общих закономерностей формирования и распространения различных типов подземных вод, общая оценка водоносности территории и условий существующего и возможного использования подземных вод. На этой основе проводится выделение перспективных площадей или участков для дальнейших поисковых или разведочных работ, а иногда для перспективной региональной оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Эта стадия исследований включает региональное изучение распространения, условий залегания а по возможности и фильтрационных свойств водоносных горизонтов и их взаимосвязи. Основными результатами гидрогеологических съемочных работ масштаба 1:200 000 являются государственная

18836

1958

гидрогеологическая карта по листам принятой в СССР разграфки, а также выбор площадей и водоносных горизонтов для постановки поисковых работ в районах, перспективных для сооружения водозаборов подземных вод (по комплексу предварительных данных), а в хорошо изученных районах — для постановки предварительной разведки. Если при этом проводится региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод, то они относятся к категории C_2 , или же (в зависимости от степени изученности) подсчитанные запасы не категоризируются.

Поиски. Назначение поисковой стадии — выбор и обоснование перспективных площадей и участков для проведения дальнейших разведочных работ на стадии предварительной разведки и предварительная оценка масштабов месторождения подземных вод. Стадия разделяется на две подстадии — общие поиски и детальные поиски.

Целевым назначением подстадии *общих поисков* являются оценка перспектив крупных гидрогеологических регионов на выявление ресурсов пресных подземных вод; выявление водоносных горизонтов и комплексов, перспективных для дальнейшей постановки поисково-разведочных работ и проведения региональной оценки эксплуатационных запасов в пределах отдельных бассейнов, регионов, площадей по конкретным водоносным горизонтам и комплексам. В результате выполнения подстадии общих поисков дается характеристика гидрогеологических условий крупных регионов: в пределах таких регионов выделяются площади, перспективные для постановки детальных поисков, а в хорошо изученных районах — для предварительной разведки. Региональная оценка запасов подземных вод проводится, в основном, по категории C_2 , в редких случаях — при недостаточной изученности региона ресурсы подземных вод, подсчитанные в результате региональной оценки, не категоризируются.

Целевым назначением подстадии *детальных поисков* являются выделение в пределах изученных районов водоносных горизонтов и водообильных их участков с благоприятными условиями для постановки дальнейших разведочных работ на стадии предварительной разведки и приближенная оценка их эксплуатационных возможностей. Главной задачей работ этой подстадии является обоснование в пределах изучаемых площадей наличия (или отсутствия) месторождений подземных вод и очередность их хозяйственного освоения.

На основании проведенных поисковых работ должны быть выделены водоносные горизонты и участки, перспективные для проведения разведочных работ на стадии предварительной разведки, дана прогнозная оценка эксплуатационных запасов в пределах выделенных участков, определено соответствие качества воды заданному назначению и установлены экономическая целе-



сообразность и очередность дальнейшего изучения перспективных участков. Прогнозные запасы подземных вод в пределах выделенных участков оцениваются главным образом по категории С₂. Для хорошо изученных районов, характеризующихся простыми гидрогеологическими условиями, или же когда заявленная потребность в воде значительно меньше потенциальных эксплуатационных ресурсов, перечисленные выше задачи могут решаться камеральным путем на основе обобщения и анализа фондовых материалов, т. е. на подстадии общих поисков. В таком случае работы подстадии детальных поисков не проводятся и разведка месторождений подземных вод начинается сразу со стадии предварительной разведки.

Предварительная разведка. Согласно существующим взглядам и методическим разработкам стадия предварительной разведки в Советском Союзе является основной при проведении разведочных работ на подземные воды [6, 26, 46]. Цель предварительной разведки — изучение основных особенностей геолого-гидрогеологических условий месторождения, количественная оценка основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и расчетных гидрогеологических параметров, общая предварительная оценка эксплуатационных запасов подземных вод по низким категориям (главным образом по категории С₁) в пределах выявленных при поисках перспективных участков и обоснование постановки детальной разведки. Предварительная разведка осуществляется при наличии заявленной потребности в воде, если месторождение (участок) по своим масштабам, качеству воды и географо-экономическому положению представляет интерес для последующего освоения.

На стадии предварительной разведки проводятся: рекогносцировочное обследование участка; бурение разведочных, картировочных и наблюдательных скважин; пробные и опытные (одиночных и кустовых) откачки; крупномасштабные полевые геофизические исследования; геофизические исследования в скважинах; гидрогеологические работы; специальные балансовые исследования; специальные методы исследований (изотопные, ядерно-физические, индикаторные и др.); отбор проб воды и пород; лабораторные работы; наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод (в том числе и на действующих водозаборах); топогеодезические работы; санитарное обследование участка работ. В зависимости от типа месторождения те или иные виды работ могут не производиться.

В результате предварительной разведки должны быть изучены основные особенности геолого-гидрогеологических условий месторождения, выявлены, охарактеризованы и предварительно оценены источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод и расчетные параметры водоносного горизонта, их изменчивость по площади и в разрезе, установлено соответствие качества воды заданному назначению и предва-

рительно оценены гидрогеологические и технические условия эксплуатации. Важной задачей, также решаемой главным образом на стадии предварительной разведки, является определение возможного ущерба окружающей среде в результате будущего отбора подземных вод. Этот ущерб может проявляться в снижении уровня грунтовых вод, обуславливающим отмирание или ухудшение габитуса растительности, уменьшение или прекращение поверхностного стока в местной гидрографической сети и т. д.

Задачи, стоящие перед предварительной разведкой, решаются с помощью бурения скважин различного назначения, проведения пробных и опытных кустовых откачек. Так, при разведке месторождений подземных вод в речных долинах главным вопросом, наряду с исчерпывающей характеристикой поверхностного стока, является определение степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод, а при разведке второго от поверхности водоносного горизонта — его взаимосвязи с водами аллювия [5, 6, 46]. Для изучения условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод и определения гидрогеологических параметров организуются специальные кусты с наблюдательными скважинами, расположенными перпендикулярно и параллельно реке (Е. Л. Минкин, 1973 г.). При разведке запасов подземных вод в артезианских бассейнах платформенного типа основным является определение расчетных параметров фильтрации и, если это необходимо, определение взаимосвязи со смежными водоносными горизонтами в слоистых толщах. Последнее вызывает необходимость проведения специальной кустовой (групповой) откачки с заложением наблюдательных скважин как на разведкуемый, так и на смежные водоносные горизонты и разделяющие слабопроницаемые слои. В ограниченных по площади структурах или массивах трещинных и трещинно-карстовых пород и в зонах тектонических нарушений особое внимание должно уделяться определению естественных ресурсов подземных вод. С этой целью необходимо дать характеристику баланса подземных вод, определить источники и выделить участки питания и разгрузки подземных вод, определить места выхода родников, участков испарения и транспирации растительности, участки инфильтрации атмосферных осадков и поглощения поверхностного стока в карстовых районах и пр. Если месторождение характеризуется гидрохимической зональностью, должно быть установлено положение границ вод некондиционного состава в плане и разрезе и дан прогноз изменения качества воды при эксплуатации.

Естественно, что в процессе предварительной разведки должны решаться только те задачи, которые определяют величину эксплуатационных запасов в пределах данного конкретного месторождения и непосредственно учитываются при подсчете запасов.

Например, если месторождение приурочено к резко неравномерно трещиноватым породам в зонах тектонических нарушений, где оценка запасов выполняется гидравлическим методом, оценка фильтрационных свойств водовмещающих пород может не проводиться. Существенное внимание следует уделить специальным балансовым исследованиям, которые в ряде случаев должны организовываться в поисковую стадию. В аридных и полуаридных районах с этой целью целесообразно организовать специальные стоковые площадки для определения величины инфильтрации атмосферных осадков. В ряде случаев можно также организовать специальные наблюдения за испарением и транспирацией растительности. В хорошо дренируемых месторождениях определяются в основном расходные статьи баланса путем организации систематических наблюдений за родниковым стоком, расходом ручьев и небольших речек. На карстовых массивах организуются наблюдения за поглощением стока в карстовые воронки.

Все перечисленные задачи решаются комплексом буровых, опытно-фильтрационных, геофизических, стационарных гидрогеологических и гидрологических наблюдений и специальных работ. Большое значение имеет организация наблюдения за режимом эксплуатации действующих водозаборов на других аналогичных месторождениях, так как для данного типа месторождений метод гидрогеологической аналогии является одним из основных. Весьма эффективно для постановки детальной работ аналоговое моделирование на стадии предварительной разведки. Оно позволяет установить относительное влияние различных граничных условий и параметров пласта на величину эксплуатационных запасов. В дальнейшем более важные из них должны изучаться с большей детальностью, а второстепенные — с меньшей, либо вообще не изучаться.

В процессе предварительной разведки самое серьезное внимание следует обратить на определение возможности применения метода гидрогеологической аналогии и выбор одного или нескольких объектов (водозаборов) — аналогов. При этом, если имеется водозабор-аналог, на стадии предварительной разведки должны обосновываться степень и характер аналогии изучаемого участка с действующим водозабором-аналогом, а также разрабатываться методика гидрогеологических расчетов с учетом опыта эксплуатации объекта — аналога.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в результате предварительной разведки проводится применительно к обобщенной схеме водозабора в основном по категории C_1 (частично — по категории В, а иногда и по категориям $A + B$) для простых условий и категории C_2 для месторождений со сложными гидрогеологическими условиями. В очень сложных гидрогеологических условиях (например, месторождения трещинно-жильных вод или подземных вод в зоне развития много-

летнемерзлых пород), где эксплуатационные запасы подземных вод можно определить только гидравлическим методом по данным опытно-эксплуатационных откачек, основная задача предварительной стадии (определение общей величины запасов) не может быть решена. В этих случаях предварительная и детальная разведки совмещаются в единую стадию, которая заканчивается опытно-эксплуатационной откачкой.

В отчете по предварительной разведке должно быть составлено обоснование целесообразности (нецелесообразности) постановки дальнейших детальных разведочных работ, предварительно выбран метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод и намечена рациональная схема водозабора.

Детальная разведка. Цель детальной разведки — обоснование проекта строительства будущего водозабора, уточнение величины эксплуатационных запасов подземных вод и доведение их изученности до степени, позволяющей провести их оценку применительно к выбранной схеме водозабора по категориям, обосновывающим выделение капиталовложений на проектирование и строительство в соответствии с «Классификацией эксплуатационных запасов подземных вод». Стадия детальной разведки подразделяется на две подстадии — детальную разведку нового месторождения и детальную разведку эксплуатируемого месторождения.

В процессе *детальной разведки нового месторождения* основными видами работ являются: бурение разведочных, разведочно-эксплуатационных и наблюдательных скважин, проведение пробных, опытных (одиночных и кустовых) и опытно-эксплуатационных откачек. Кроме того, в общий комплекс работ входят геофизические исследования в скважинах, наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод (в том числе и на действующих водозаборах), гидрометрические работы, отбор проб воды и грунтов, лабораторные и топогеодезические работы, а при необходимости и специальные виды исследований. Детальная разведка проводится преимущественно на участке проектируемого водозабора, но в отдельных случаях за пределами участка проводится детализация факторов, наиболее существенно влияющих на величину запасов подземных вод.

По результатам детальной разведки, проводимой применительно к выбранной схеме водозабора, уточняются условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод (в том числе и качество подземных вод) и основные параметры водоносного горизонта до степени, позволяющей обосновать количество эксплуатационных скважин, расстояние между ними, проектные дебиты и понижения. Детальная разведка нового месторождения считается завершенной после утверждения запасов подземных вод в ГКЗ (ТКЗ) или НТС (в тех случаях, когда не требуется утверждения ГКЗ СССР или ТКЗ).

В простых гидрогеологических условиях и при небольшой потребности в воде, когда работы, проведенные для решения задач предварительной разведки, оказываются достаточными для окончательного выбора схемы водозабора и оценки эксплуатационных запасов по категориям, обосновывающим выделение капиталовложений на проектирование и строительство водозабора, подстадия детальной разведки нового месторождения может не проводиться. В этих случаях утверждение запасов проводится на основании результатов предварительной разведки.

Подстадия детальной разведки эксплуатируемого месторождения проводится в целях: утверждения в ГКЗ СССР (ТКЗ) эксплуатационных запасов подземных вод на участках водозаборов, работающих на неутвержденных запасах; перевода запасов из низких категорий изученности в более высокие; если в процессе эксплуатации выявилось неподтверждение утвержденных запасов (в том числе и вследствие изменения гидрологического или гидрохимического режима); увеличения эксплуатационных запасов водозабора при увеличении потребности в воде (например, на флангах водозабора, более глубоких или не эксплуатируемых водоносных горизонтов и комплексов); переоценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях искусственного их восполнения или же работы водозабора в условиях поддержания пластового давления. При этом необходимо иметь в виду, что понятие подстадии детальной разведки эксплуатируемого месторождения обязательно предполагает наличие действующего водозабора. Если месторождение разведано, но не эксплуатируется, то дополнительные работы по его детальной разведке, например для обеспечения прироста запасов, будут соответствовать продолжению детальной разведки нового месторождения.

Основным видом работ на стадии эксплуатационной разведки являются наблюдения за нарушенным режимом подземных вод на участке водозабора: дебитами эксплуатационных скважин и суммарной производительностью водозабора, уровнем подземных вод, в том числе при пуске и остановке отдельных скважин, качеством отбираемой воды и содержанием отдельных компонентов, продвижением контура некондиционных подземных вод, если они имеются и т. д. Буровые, опытные и геофизические работы в процессе эксплуатационной разведки проводятся в минимальных объемах (могут не проводиться вообще) и по методической направленности и решаемым вопросам соответствуют детальной разведке нового месторождения. В случае необходимости на этой подстадии можно поставить и промышленные натурные эксперименты по искусственному восполнению запасов подземных вод.

Детальная разведка эксплуатируемого месторождения также считается завершенной при утверждении (переутверждении)

эксплуатационных запасов подземных вод в ГКЗ СССР (ТКЗ) или на НТС соответствующей геологической организации.

Эксплуатационная разведка. Эксплуатационная разведка проводится в условиях действующего водозабора с утвержденными в ГКЗ (ТКЗ) запасами в целях выявления соответствия режима эксплуатации прогнозным расчетам, выполненным по материалам разведочных работ, переоценки эксплуатационных запасов подземных вод по данным эксплуатации (в случае несоответствия запасов их утвержденной величине), обоснования рационального режима эксплуатации, получения материалов для оценки эксплуатационных запасов на других месторождениях и участках, находящихся в аналогичных условиях. Работы на этой стадии проводятся либо силами эксплуатирующих организаций, либо подразделениями Министерства геологии СССР за счет средств водопотребителей. Эксплуатационная разведка заключается в проведении систематических наблюдений за уровнем и расходом подземных вод на водозаборе, наблюдений за химическим составом воды не только на участке водозабора, но и на прилегающих площадях, бурении дополнительных наблюдательных и, при необходимости, разведочных скважин, экономической характеристике работы водозабора.

В результате эксплуатационной разведки проводится оперативное регулирование режима эксплуатации, разрабатываются рекомендации по рациональному режиму и необходимой реконструкции водозабора.

В этом разделе не рассматривается методика проведения гидрогеологических поисковых и разведочных работ, поскольку это не является задачей настоящей книги. Интересующимся методикой проведения гидрогеологических работ на разных стадиях можно рекомендовать обширную специальную литературу по этому вопросу [3, 5, 6, 26, 28, 46 и др.].

1.3. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод — важнейший раздел разведочной гидрогеологии, что обусловило пристальное внимание ученых и производственников к этому вопросу. Разработке основных принципов и методов оценки запасов подземных вод посвящена обширная опубликованная литература [3, 6, 26, 28, 46 и др.], на базе которой составлен настоящий раздел.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод заключается в определении количества воды, которое может быть отобрано из каптажных сооружений при заданном понижении уровня подземных вод, или же в прогнозе понижения уровня воды при заданной величине водоотбора в пределах оцениваемой площади или участка. При этом подразумевается, что

отбор подземных вод должен осуществляться при наиболее рациональной в технико-экономическом отношении схеме расположения каптажных сооружений (водозабора) и обеспечивать необходимое качество воды в течение всего времени эксплуатации водозабора. Оценка запасов подземных вод делится на локальную и региональную.

Локальная оценка производится на основе детальных разведочных работ конкретного месторождения (участка) или нескольких месторождений с доведением степени изученности запасов до категорий, обосновывающих выделение ассигнований на капитальное строительство (А и В). Локальная оценка производится для удовлетворения потребности в воде конкретных потребителей — населенного пункта, промышленного предприятия, массива орошения, группового водопровода для водоснабжения ряда сельскохозяйственных районов и т. д. Региональная оценка запасов подземных вод проводится на больших площадях, охватывающих обычно крупный гидрогеологический регион (артезианский бассейн, бассейн трещинных вод и т. д.), как правило, на основе имеющихся материалов без проведения разведочных работ (за исключением обследования действующих водозаборов); запасы оцениваются по категориям изученности C_2 и C_1 . Региональная оценка проводится для получения общего количественного представления о ресурсах подземных вод той или иной территории, планирования в ее пределах геологоразведочных работ на подземные воды, перспектив размещения народнохозяйственных объектов — водопотребителей и других целей. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод для орошения или других целей, предусматривающих неравномерный отбор воды в течение года, проводится применительно к заданному режиму эксплуатации, а их утверждение — в количествах, соответствующих среднегодовому расходу водозаборов. При оценке запасов по родниковому стоку в качестве эксплуатационных принимается минимальный суточный расход года 85—95 % обеспеченности согласно СНИП, или же по среднегодовому расходу родников, если предусматривается режим водопотребления, соответствующий естественной изменчивости расхода родников.

Оценка и утверждение эксплуатационных запасов подземных вод проводятся применительно к существующей природной обстановке и источникам формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Если же природная обстановка и источники формирования запасов изменились в ту или иную сторону (создание орошаемых массивов, зарегулирование речного стока и сокращение паводков), то запасы должны переоцениваться с учетом новых условий. При оценке запасов подземных вод в условиях искусственного их восполнения она заключается в совместном расчете водозаборов и инфильтрационных сооружений — каналов, бассейнов, нагнетательных скважин и т. д.

В районах, характеризующихся напряженным водохозяйственным балансом и дефицитом водных ресурсов, при оценке запасов подземных вод необходимо учитывать влияние их отбора на поверхностный сток, расходы родников и т. д.; во всех случаях должен рассматриваться вопрос о возможном ущербе окружающей среде при эксплуатации подземных вод.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод производится гидродинамическими, гидравлическими, балансовыми методами, методом гидрогеологической аналогии или совместным применением указанных методов.

Гидродинамические методы. Методы оценки эксплуатационных запасов заключаются в расчете водозаборов по соответствующим формулам, полученным на основе решения дифференциальных уравнений фильтрации с учетом начальных и граничных условий и фильтрационных параметров для рассматриваемой области фильтрации. Исходные дифференциальные уравнения и полученные на их основе формулы являются достаточно строгими с математической и физической точек зрения [3, 6 и др.], хотя фильтрационные параметры, определяемые в процессе разведочных работ и используемые в расчетах достаточно приближены или даже условны. Кроме того, применение гидродинамических методов требует определенной схематизации граничных условий (уровни воды в реках или водоносных горизонтах, питающих эксплуатируемый горизонт, инфильтрация атмосферных осадков и т. д.), что в сложных гидрогеологических условиях также является непростой задачей. Тем не менее гидродинамические методы являются основными при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Они подразделяются на аналитические расчеты и математическое моделирование.

Аналитические расчеты целесообразно применять при разведке месторождений, характеризующихся довольно простыми условиями (месторождения первой и второй групп — см. 1.1), которые можно без больших погрешностей схематизировать применительно к типовым расчетным схемам, учитывающим граничные условия в плане и разрезе. Аналитические расчеты применяются для оценки запасов подземных вод в месторождениях всех типов, но с увеличением сложности природных условий, например неопределенным характером границ (постепенное изменение фильтрационных параметров горизонта, периодический сток в поверхностном водотоке, резкая неоднородность фильтрационных свойств водовмещающих пород эксплуатируемого горизонта и т. д.), достоверность оценки запасов аналитическими методами заметно снижается вследствие невозможности учета граничных условий с необходимой точностью и усреднения значений фильтрационных параметров. Подробно применение аналитических расчетов для оценки запасов подземных вод рассмотрено в работах [3, 6, 28, 46 и др.].

Математическое моделирование эффективно применяется при оценке запасов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях, когда, решая серию инверсных и обратных задач, удается уточнить фильтрационные и емкостные характеристики водоносного горизонта, начальные и граничные условия области фильтрации. Кроме того, применение аналоговых сеточных моделей позволяет точнее, чем это возможно при аналитических расчетах, учесть изменение фильтрационных свойств пласта и изобразить его контуры, а также количественно оценить отдельные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Решение о том, будет ли использоваться математическое моделирование при оценке запасов подземных вод, должно обязательно приниматься перед стадией детальной разведки, а по возможности и до предварительной разведки. По мере повышения сложности гидрогеологических условий резко возрастает объем информации, необходимой для обоснованного построения модели месторождения, так что иногда в сложных условиях применение математического моделирования может оказаться экономически неэффективным. Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод в настоящее время применяется главным образом аналоговое моделирование на сеточных или сплошных устройствах. Моделирование на ЭЦВМ и гибридных устройствах применяется в меньших масштабах, но в будущем роль моделирования на цифровых машинах будет, по-видимому, неуклонно возрастать. Теория и методы оценки запасов подземных вод изложены в работе [7] и других.

Гидравлические методы. Методы используются главным образом в сложных гидрогеологических условиях, когда трудно или невозможно определить источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод, неясны граничные условия, а фильтрационные свойства пласта характеризуются резкой неоднородностью. Оценка эксплуатационных запасов заключается в определении дебита скважины (водозабора) или прогнозных понижений непосредственно по данным откачки. Гидравлическими методами определяется понижение уровня в скважине при заданном дебите с помощью экстраполяции данных откачки по кривым зависимости дебита от понижения уровня с применением эмпирических зависимостей Альтовского, Келлера и др. Гидравлические методы применяются также для определения взаимовлияния скважин при их совместной работе на основе фиксации срезок от их взаимодействия по методу Альтовского. При неустановившемся режиме с помощью гидравлического метода можно прогнозировать понижение уровня на конец работы водозабора, исходя из определенной в процессе откачки закономерности снижения уровня при данном расходе. Применение гидравлических методов подразумевает обобщенный учет влияния всех факторов на работу скважины (водозабора). Однако, гидравлическими методами оценки запасов

нельзя определить обеспеченность восполнения запасов, поскольку в гидравлические зависимости не входят величины, характеризующие баланс потока. Кроме того, при применении гидравлических методов нет уверенности, что в процессе опыта (откачки) проявились все факторы, влияющие на приток воды к скважине, и что в процессе эксплуатации не проявятся какие-либо новые факторы, которые обусловят иную зависимость дебита от понижения (в том числе и снижения уровня во времени), чем та, которая была определена опытным путем в ходе разведочных работ. Поэтому гидравлические методы обязательно должны применяться совместно с балансовыми или методом гидрогеологической аналогии. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод гидравлическим методом рассмотрена в работах [3, 6, 28, 46 и др.].

Балансовые методы. Наряду с гидродинамическими и гидравлическими методами для оценки эксплуатационных запасов подземных вод применяются и балансовые методы. Они основаны на определении количества воды, поступающей различными путями на оцениваемую территорию или участок водозабора (называемую обычно балансовой площадью) и расходуемой с нее поверхностным и подземным стоком, транспирацией, испарением и т. д. В обычных условиях балансовые методы значительно уступают по точности получаемых результатов гидродинамическим и гидравлическим и используются в комплексе с ними в качестве вспомогательных для подсчета (как правило весьма приближенного) общей обеспеченности эксплуатационных запасов. Но в практике разведочных работ в сложных гидрогеологических условиях, в частности в аридных и полуаридных районах, значение балансовых методов оценки возрастает, а иногда он становится основным (М. А. Хордикайнен, 1979 г.). Балансовые методы дают возможность количественно оценить естественные ресурсы, формирующиеся в пределах небольших областей питания, в частности роль отдельных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Так же велика роль балансовых методов при региональной оценке ресурсов подземных вод, например при площадном размещении водозаборов по сетке. Однако балансовые методы не дают возможности определить, какая часть естественных запасов и естественных ресурсов может быть привлечена к водозабору, какова будет величина запасов подземных вод, привлекаемая к водозабору в процессе эксплуатации, и т. д. Кроме того, балансовый метод дает не положение динамического уровня в скважинах на тот или иной период времени, а лишь общую сработку и понижение уровня подземных вод в пределах всей оцениваемой балансовой площади. Поэтому и необходимо совместное применение балансовых и гидродинамических или гидравлических методов при оценке запасов подземных вод. Методика определения различных балансовых составляющих

в процессе разведки, а также применения балансовых методов при подсчете запасов подземных вод изложена в работах [6 и др.].

Метод гидрогеологических аналогий. Сложность гидрогеологических условий и невозможность в связи с этим количественного определения источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод заставляют прибегать к использованию метода гидрогеологических аналогий. Сущность этого метода заключается в том, что те или иные характеристики водоносных горизонтов, граничные условия или иные факторы, определяющие работу будущего водозабора, с известного объекта, эксплуатируемого или (реже) детально разведанного, переносятся на новый, эксплуатационные запасы которого подлежат оценке. При сопоставлении рассматриваемых участков могут совпадать различные характеристики; оценка запасов проводится по модулю водоотбора на единицу площади или длины. Такая аналогия называется *полной*. В других случаях с изученного (эксплуатируемого) месторождения подземных вод на изучаемый объект можно перенести только некоторые характеристики, например инфильтрацию атмосферных осадков или удельную величину разгрузки, скажем, на 1 км долины реки и т. д. Здесь приходится говорить о частичной аналогии. Для обоснованного применения метода аналогии необходимо сопоставить факторы, определяющие общие гидрогеологические условия и формирование эксплуатационных запасов эталонного (эксплуатируемого) и разведываемого объекта, и доказать их идентичность [6, 16]. Обоснование гидрогеологической аналогии проводится на основании изучения геоморфологических, геолого-структурных, тектонических, а также специфических гидрогеологических условий (фильтрационных параметров, инфильтрационного питания, площадей и интенсивности разгрузки и т. д.). Поэтому применение метода гидрогеологических аналогий предусматривает обязательное проведение разведочных работ, доказывающих правомерность аналогии. При этом по аналогии целесообразно принимать лишь те факторы, которые нельзя надежно установить в процессе разведочных работ, например водоотдачу в трещиноватых и закарстованных породах. Основой при применении метода аналогии является сходство объектов не по абсолютным значениям тех или иных величин, а по закономерности их изменений по площади и в разрезе, изменениям граничных условий и т. д. Методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод методом гидрогеологических аналогий подробно описываются в работах [6, 46 и др.].

Заканчивая краткое рассмотрение методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод, следует упомянуть и оценку запасов подземных вод по наблюдениям за родниковым стоком, характеризующуюся рядом специфических особенностей [6, 46],

но поскольку при оценке запасов по родниковому стоку геофизические методы исследований не применяются, этот метод оценки запасов подземных вод здесь не рассматривается.

1.4. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ, ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ДРУГИХ МЕТОДОВ

Как уже упоминалось в разделе 1.1, увеличение использования подземных вод обусловило непрерывное развитие методики поисков и разведки их эксплуатационных запасов. Этот процесс ускорился с начала 60-х годов, когда в практику подсчета запасов подземных вод начали активно внедрять гидродинамические методы, основанные на уравнениях неустановившейся фильтрации, в отличие от предыдущего периода, когда в качестве теоретической основы подсчета запасов использовались представления об установившемся притоке воды к каптажам. Изменение методики оценки запасов подземных вод потребовало и соответствующего изменения, усовершенствования методики поисковых и разведочных работ. Увеличение требований к объему информации и повышению ее точности, наряду с увеличением доли труднооткрываемых месторождений подземных вод, находящихся в сложных гидрогеологических условиях, предопределило привлечение к гидрогеологическим поисково-разведочным работам различных негидрогеологических, нетрадиционных методов исследований — геофизических, ядерно-физических, гидрогеохимических, индикаторных, геоботанических, гидролого-гидрометрических и др. Некоторые из них (геофизические, индикаторные) иногда применялись и ранее для гидрогеологических разведок, но лишь в последние 20—25 лет получили довольно широкое развитие. Увлечение в 60-х и на рубеже 70-х годов формализацией гидродинамической модели месторождений подземных вод привело к тому, что основное внимание при разведке стало уделяться получению фильтрационных параметров и данных для упрощенной схематизации месторождения, а не изучению месторождения подземных вод как геологического тела, раскрытию генетических связей между средой и условиями фильтрации в ней жидкости (Б. В. Боровский и др., 1980 г.). В результате, как показал анализ опыта эксплуатации действующих водозаборов, на многих из них выявилось существенное занижение эксплуатационных запасов, в частности в артезианских бассейнах платформенного типа (Л. С. Язвин, 1972 г.). Стало очевидно, что в процессе разведки, не снижая уровня оценки фильтрационных параметров пласта и определения его граничных условий, основное внимание необходимо сосредоточивать на изучении геологической природы месторождения, процессов фильтрации, происходящих в водоносном горизонте, условий формирования запасов подземных вод и их источников. Как показывает анализ

работы водозаборов, в зоне интенсивного водообмена практически отсутствуют условия, когда какой-либо водоносный горизонт или его часть можно рассматривать в отрыве от окружающей (в гидрогеологическом смысле) среды.

В таких условиях значительно повышаются требования к информативности полевых работ, которые не всегда можно обеспечить традиционными методами ведения гидрогеологических разведок, вследствие чего необходимо привлекать новые методы из других наук — точных или естественных — или же методы геологической науки, недостаточно применяющиеся в гидрогеологических исследованиях, в частности при разведке подземных вод (структурный, литолого-фациальный анализ, рассмотрение истории геологического развития — в основном при региональных оценках и т. д.). Разумеется, новые дополнительные методы исследований не приведут к полной отмене старых. Традиционные методы гидрогеологической разведки и в будущем останутся основными, но включение в арсенал гидрогеологических исследований геофизических, ядерно-физических, индикаторных и других сравнительно новых или редко применяющихся в гидрогеологии методов наряду с повышением информативности позволит сократить время исследований и удешевит их.

При помощи рационального комплексирования различных методов исследований можно будет, по-видимому, в какой-то мере нейтрализовать доминирующую сейчас во всех странах мира тенденцию к повышению стоимости разведки единицы любого полезного ископаемого, в том числе и подземных вод.

Различные методы исследований, которые рекомендуются для применения при поисках и разведке эксплуатационных запасов подземных вод, можно разделить на три группы. К первой из них относятся традиционные методы, методика которых хорошо разработана и общеизвестна; они повсеместно внедрены в практику и широко используются. Это бурение скважин, опытно-фильтрационные работы (откачки из скважин, наливыв в шурфы), наблюдения за ненарушенным режимом подземных вод, гидрохимическое опробование водопунктов, гидрогеологические съемки и комплексные съемки для целей мелиорации. Ко второй группе методов относятся те, методика которых в целом достаточно разработана, но которые применяются в гидрогеологических исследованиях недостаточно. Это геофизические, геоботанические, гидролого-гидрометрические, индикаторные, гидрогеохимические, аэрофотосъемочные методы. Несомненно, методика использования их для поисков и разведки запасов подземных вод должна развиваться и совершенствоваться. В третью группу входят новые методы исследований, методика применения которых переживает период становления и использование которых в гидрогеологических целях носит пока единственный экспериментальный характер. К ним относятся изотоп-

ные, дистанционные (кроме аэрофотосъемки), математические (кроме моделирования на АВМ и аналитических расчетов) методы, водно-гелиевое опробование и др. Выбор рационального комплекса методов определяется типом месторождения подземных вод, его сложностью, стадией исследований, задачей, стоящей перед исследователем, общим характером работ (региональным или локальным).

Традиционные методы включают в себя буровые и опытно-фильтрационные работы, наблюдения за режимом подземных вод, изучение состава и качества подземных вод. Традиционные методы и в будущем останутся основными при поисках и разведке подземных вод. Традиционными методами изучается собственно геология месторождения, его литолого-фациальные и структурные особенности, водовмещающие свойства пород, качество воды, иногда условия питания (в частности, режим подземных вод). Гидрогеологические основы и методика применения этих методов освещены в многочисленных публикациях [3, 5, 6, 26, 28, 46 и др.].

Ядерно-изотопные методы заключаются в использовании стабильных и радиоактивных изотопов для решения различных гидрогеологических задач. К стабильным изотопам относятся в первую очередь изотопы составляющих молекул воды — водорода (дейтерий) и кислорода. К радиоактивным изотопам, изучение содержания в воде которых наиболее часто применяется при решении гидрогеологических задач, относятся прежде всего тритий и углерод-14, далее радий и радон. Ядерно-изотопные методы основаны на использовании периода полураспада, что позволяет определять продолжительность пребывания воды в породе (определять «возраст» воды) и период водообмена.

Гидролого-гидрометрические методы в практике гидрогеологических и поисковых работ занимают важное место, и их роль при разведке месторождений подземных вод постоянно растет. Особенно важное значение они приобретают при разведке месторождений подземных вод, связанных с реками, в частности небольшими, когда сток реки меньше, соизмерим или лишь ненамного (в 2—4 раза) превосходит расход проектируемого водозабора. Описание, методика и состав работ освещены в различных публикациях [18, 28], а также в работах М. А. Хордикуайнена (1973, 1979 гг. и др.).

Дистанционные методы включают в себя аэрофотосъемку, космическую фото- и телевизионную съемку, радарную, инфракрасную, мезозональную съемку. Под дистанционными методами понимается изучение природных объектов с помощью удаленных от их поверхности приемников, фиксирующих электромагнитное излучение изучаемого объекта различной длины. Некоторые дистанционные методы исследований основаны на испускании электромагнитного импульса и фиксации его отра-

жения от поверхности изучаемого объекта (радарные методы). К дистанционным относятся все типы цветной, панхроматической, многокамерной и других видов аэрофотосъемки с самолетов и других видов воздухоплавательных средств, а также с ИСЗ. Применение дистанционных методов позволяет сократить сроки и удешевить стоимость получения различной информации, необходимой гидрогеологу при проведении поисковых или разведочных (аэрофотоматериалы) на воду работ. Методика применения дистанционных методов в гидрогеологии в опубликованных работах отражена слабо.

Геоботанические методы основаны на изучении растительности и ее взаимосвязи с подземными водами. Они применяются главным образом в аридных и полуаридных районах.

При этом растительные сообщества (фитоценозы) играют существенную роль при поисках и разведке подземных вод. Они являются индикатором подземных вод и характерным поисковым признаком; при разведке и оценке запасов подземных вод — это фактор интенсивного расходования влаги, который обязательно необходимо учитывать в ходе балансовых расчетов при неглубоком (до 3—5 м) залегании подземных вод.

Методика проведения геоботанических исследований и определения транспирационного расхода достаточно хорошо разработана и освещена (С. В. Викторов и др., 1962 г.; Н. Г. Несветайлова, 1967 г., В. Н. Островский, 1976 г. и др.).

Индикаторные исследования используются в основном для изучения скорости фильтрации, направления движения (т. е. решают те же задачи, что и, например, метод заряженного тела), оценки эффективной пористости пород. Они широко применяются при изучении схемы фильтрации подземных вод в сложных гидрогеологических условиях. В последнее время значительное развитие метод искусственных индикаторов получил при исследовании процессов перетекания в слоистых толщах, в частности фильтрации в разделяющих слабопроницаемых слоях.

Искусственные индикаторы применяются главным образом при локальных исследованиях — на стадиях предварительной, детальной, а иногда и эксплуатационной разведки подземных вод, хотя применение искусственных индикаторов поблизости от действующего водозабора хозяйственно-питьевого назначения встречает ряд ограничений санитарно-медицинского характера. В зависимости от измеряемых величин выделяются индикаторные методы, основанные на изучении изменения цвета раствора под влиянием красителя (колориметрические), изменения электропроводности раствора вследствие введения электролита (электролитические), изменении радиоактивности при запуске радиоактивных индикаторов (радиоактивные). Вопрос о выборе типа индикатора определяется с учетом конкретных гидрогеологических условий и схемы исследований.

Водно-гелиевое опробование основано на потоке гелиевого флюида, поступающего из мантии в верхние горизонты земной коры. Там, где водоносные горизонты надежно изолированы от поверхности земли, а разделяющие слои характеризуются повышенной проницаемостью, концентрация гелия в подземных водах выше. Если водоносные горизонты получают питание за счет инфильтрации атмосферных осадков, характеризующихся практическим отсутствием гелия, или перетеканием вниз грунтовых вод, то содержание гелия в подземных водах понижено. Таким образом, изучение распределения концентраций гелия позволяет наметить зоны более тесной взаимосвязи подземных вод в слоистых толщах, выявить ослабленные зоны, например, разрывных нарушений и т. д. Применение водно-гелиевого опробования, по-видимому, весьма перспективно при исследованиях на значительных площадях, например в процессе региональных оценок запасов подземных вод.

Геофизические методы при поисках и разведке эксплуатационных запасов подземных вод по своему значению и информативности занимают второе место вслед за традиционными гидрогеологическими — бурением и опробованием гидрогеологических скважин. Они позволяют увеличить объем информации при проведении разведочных на воду работ и ускорить ее получение при сравнительно небольших затратах. Виды и методика применения геофизических методов исследований в процессе разведки на воду, их рациональное комплексирование рассмотрены в следующих разделах книги.

2. МЕТОДЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методы геофизики, применяемые при поисках и разведке подземных вод, можно подразделить на две основные группы: полевые (включая околоскважинные методы) и скважинные¹. Полевые наблюдения объединяют исследования, выполняемые на земной и водной поверхности, а также с воздуха.

2.1. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Задачи, решаемые геофизическими методами при поисках и разведке подземных вод, можно объединить в несколько групп (направлений): а) уточнение геологического строения исследуемой территории, выделение в ее пределах основных гидрогеологических структур и гидрогеологическая стратификация разреза; б) изучение гидрохимических условий; в) исследование коллекторских и фильтрационных свойств пород и гидродинамики подземного потока; г) изучение геокриологических условий. Каждое направление включает серию частных задач, перечень и решение которых рассматриваются в разделах 3—6 настоящей работы. Геофизические методы могут привлекаться на всех стадиях гидрогеологических исследований, но наибольшее применение они получили при детальных поисках.

Применяемые геофизические методы. В настоящее время в геологической разведке применяются электро-, сейсмо-, магнито-, грави-, терморазведка и др. Результаты их можно использовать при поисках и разведке подземных вод. Однако вследствие разнообразия природных условий резко меняются эффективность и стоимость различных видов геофизических работ. Не все геофизические методы достаточно опробованы и приспособлены для решения гидрогеологических задач. В силу указанных обстоятельств их можно разделить на две группы. Первая объединяет методы, которые рекомендуется ставить при поисках и разведке подземных вод, вторая охватывает методы, результаты которых получены ранее при других исследованиях. Данные методов второй группы могут использоваться при проводимых исследованиях, но специально ставить их в поле обычно нецелесообразно. В табл. 1 кратко охарактеризованы основные методы первой группы.

К геофизическим методам первой группы можно отнести также околоскважинные исследования. Они служат для определения скорости и направления подземного потока и устано-

¹ Все эти методы ниже для краткости называются «геофизическими».

вления конфигурации депрессионной воронки, образующейся при откачке скважин. Геофизическими методами можно решить эти задачи, имея в распоряжении лишь одну скважину. Для определения направления и скорости подземного потока применяется метод заряженного тела [14]. Он достаточно прост и может с успехом применяться во многих случаях. Для оценки радиуса депрессионной воронки до и во время откачки скважины производят вокруг нее на площади, несколько большей чем предполагаемый радиус, наблюдения методом ВП или ЕП. Обычно интенсивные аномалии отмечаются в пределах депрессионной воронки. Одновременно проводятся сейсмические наблюдения с целью определения уровня грунтовых вод. Методика геофизического изучения депрессионных воронок описана в работе В. В. Ильютовича (1967 г.).

Геофизические методы второй группы охватывают различные модификации электро-, сейсмо-, магниторазведки и радиометрии, используемые в практике нефтяной, рудной разведки и т. п.

При изучении артезианских бассейнов могут быть использованы результаты наблюдений следующих методов электроразведки: теллурических токов (ТТ), магнито-теллурического зондирования и профилирования (МТЗ и ТП), зондирования становлением электрического и магнитного полей в дальней зоне (ЗСЕ и ЗСМ), частотного зондирования (ЧЗ). Достоинством всех этих методов является возможность по их данным оценить величину продольной электрической проводимости S рыхлых пород, перекрывающих фундамент. Дополнительную ценную информацию можно получить по данным методов МТП, МТЗ, ЗСМ и ЧЗ, основанных на определении магнитной составляющей электромагнитного поля и позволяющих изучать геоэлектрический разрез под высокоомными экранами (например, под мощной толщей многолетнемерзлых пород, под карбонатными и галогенными породами и т. п.). Разнообразные методы рудной электроразведки, применяемые в области щитов и горноскладчатых сооружений, также дают ценный первичный материал, который после соответствующей интерпретации можно использовать в гидрогеологических целях для геологического картирования, прослеживания водообильных разломов и др.

Из методов сейсморазведки, результаты которых можно использовать при гидрогеологических исследованиях, назовем метод общей глубинной точки (МОГТ). Особенно большие возможности имеет МОГТ при изучении карбонатных пород, часто перемежающихся с глинистыми.

Из магниторазведочных методов упомянем аэромагнитную съемку. Ее материалы можно использовать в первую очередь в области гидрогеологических массивов для геологического картирования скальных пород. Известный интерес представ-

Таблица 1

Геофизический метод (или модификация)	Изучаемые поля и параметры	Область применения метода	Примечание
Электроразведка Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ)	Электрическое поле постоянного или переменного низкочастотного тока; удельное сопротивление ρ .	Практически является универсальным методом. Позволяет расчленить геологический разрез по вертикали на достаточную глубину; по данным ВЭЗ можно определить удельное электрическое сопротивление пород, которое связано с их литологическим составом, увлажненностью, температурой, степенью уплотнения, фильтрационными свойствами, а также с минерализацией подземных вод.	Имеется большое количество модификаций ВЭЗ, но они применяются значительно реже основного метода (см. ниже).
Круговое вертикальное электрическое зондирование (КВЭЗ)	Электрическое поле постоянного тока; коэффициент кажущейся анизотропии λ_k , удельное сопротивление ρ .	Применяется обычно при изучении массивных пород, когда имеет место заметная анизотропность разреза [22]; позволяет оконтурить по площади и в разрезе зоны, где трещиноватость (кавернозность) пород повышена, и определить основное направление вертикальной трещиноватости.	При изучении линз пресных вод установлено, что азимут осей эллипсов анизотропии, фиксируемых КВЭЗ, испытывает резкое изменение, начиная с определенных разносов АВ, а величина этих разносов четко коррелируется с глубиной до уровня грунтовых вод (В. В. Галаган, 1976 г.)
Дипольное электрическое зондирование (ДЗ)	Электрическое поле постоянного тока; удельное электрическое сопротивление ρ .	Метод целесообразно использовать вместо ВЭЗ при глубине исследований более 500—800 м; кривые ДЗ позволяют лучше дифференцировать разрез как по вертикали, так и по горизонтали.	Метод удобно использовать при изучении акваторий.
Зондирование методом вычитания полей (ЗМВП), зондирование по методу двух составляющих и другие методы с дифференциальными схемами	Электрическое поле постоянного тока; удельное электрическое сопротивление ρ .	Методы электроразведки с использованием дифференциальных схем ЗМВП, зондирование по методу двух составляющих (А. Н. Богомолов, 1971 г., и др.) применяются в отдельных случаях, когда дифференцированность геоэлектрического разреза недостаточна; использование их затрудняется наличием существенных помех при неоднородных поверхностных условиях, а производительность значительно ниже производительности метода ВЭЗ.	—
Электропрофилирование (ЭП)	Электрическое поле постоянного тока (или тока низкой частоты); кажущееся электрическое сопротивление ρ_k .	Применяется преимущественно для прослеживания вертикальных контактов, а также для выявления горизонтальных изменений геоэлектрических параметров. Глубина исследований — до 100—150 м. Наиболее часто используется двухразностное симметричное ЭП (СЭП) в комплексе с малоуглубинными ВЭЗ.	При детальном исследовании используются иногда более сложные схемы: комбинированное профилирование (КЭП), дипольное профилирование (ДЭП), градиентное профилирование (АВ-fix), профилирование по методу двух составляющих и др. Работа со сложными схемами резко снижает производительность труда и не всегда дает заметное повышение геологической эффективности; применение таких схем требует строгого обоснования.
Резистивиметрия (в полевом варианте)	Электрическое поле постоянного тока (или тока низкой частоты); удельное электрическое сопротивление ρ .	Применяется в мелких скважинах, колодцах, горных выработках, открытых водоемах и позволяет получить представление об электрическом сопротивлении поверхностных и подземных вод и их примерной минерализации; метод также способствует выявлению зон разгрузки подземных вод.	Резистивиметрия, как правило, сопровождается термометрическими замерами.

Геофизический метод (или модификация)	Изучаемые поля и параметры	Область применения метода	Примечание
Метод естественного электрического поля (ЕП)	Постоянное (или слабо меняющееся) электрическое поле; потенциал электрического поля V .	Применяется непосредственно для изучения процессов фильтрации подземных вод; рыхлая песчано-глинистая среда является наиболее благоприятной для образования естественных потенциалов. Метод позволяет выявить участки инфильтрации поверхностных вод в глубь земли, а также зоны разгрузки подземных вод; глубинность — не более 5—10 м.	Сложный рельеф, геоэлектрическая неоднородность приповерхностной части разреза и ряд других помех резко снижают эффективность метода. Но при изучении придонного слоя водоемов помехи резко сокращаются. В субаквальных условиях метод используется также для геологического картирования.
Электрическое зондирование по методу выведенных потенциалов (ВЭЗ-ВП)	Убывающее электрическое поле при выключенном источнике тока. Электрическое поле, обусловленное электрохимической активностью среды, измеряемое при выключенном или включенном источнике тока; поляризуемость η и временной параметр τ .	С помощью метода ВЭЗ-ВП можно расчленить слабо дифференцированный геоэлектрический разрез, когда обычные зондирования ВЭЗ становятся неэффективными; можно также изучить фильтрационные свойства пород, определить положение уровня грунтовых вод (УГВ) и др. Применение метода становится особенно желательным в условиях резко меняющейся («пестрой») минерализации грунтовых вод при одновременном изменении литологического состава пород [42 и др]. Существенно увеличивается информативность метода, если использовать в качестве дополнительной характеристики временные параметры кривой спада ВП [32, 37].	Важные дополнительные сведения метод дает при регистрации круговых диаграмм поляризуемости η_k ; это позволяет сделать заключение о характере колюматации карбонатных пород. В последние годы в связи с разработкой математических основ количественной интерпретации данных ВЭЗ-ВП с использованием ЭВМ [37] эффективность метода резко возросла; мешают быстрейшему внедрению его в геологическую практику высокая стоимость, сравнительно ограниченная глубинность, необходимость использования тяжелой техники.
Зондирование становлением электрического поля в ближней зоне (ЗСБЗ)	Нестационарное электромагнитное поле; удельное электрическое сопротивление ρ .	Сухие пески и другие высокоомные породы, являющиеся экраном для постоянного тока (И. Я. Першин, 1978 г.). Метод с глубины 20—40 м позволяет более дифференцированно расчлениать разрез, хорошо выделяя маломощные глинистые горизонты.	Отсутствие серийной аппаратуры препятствует внедрению в производство этого высокопроизводительного метода
Дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП)	Переменное электромагнитное поле; импеданс среды Z .	Метод ДЭМП является аналогом ЭП, но для него высокоомные экраны в приповерхностной части не служат помехой. Ввод энергии в землю осуществляется индукционным способом; в условиях залегания на поверхности мерзлых или других высокоомных пород это чрезвычайно облегчает проведение работ и резко увеличивает производительность труда. Недостаток метода — малая глубина исследований — первые десятки метров.	ДЭМП целесообразно использовать в криолитозоне при малоглубинных исследованиях (в комплексе с ВЭЗ).
Сейсморазведка корреляционным методом преломленных волн (КМПВ)	Поле упругих сейсмических колебаний; скорость продольных (v_p) и поперечных (v_s) волн; эффективный коэффициент затухания продольных (α_p) и поперечных (α_s) волн.	Применяется для определения УГВ, литологического расчленения разреза, оценки мощности рыхлых пород, залегающих на скальном основании, выявления и прослеживания древних погребенных долин, обнаружения зон разломов и зон трещиноватости и др. Обычно работы проводятся стандартной аппаратурой с ударными источниками возбуждения упругих колебаний, что резко ограничивает глубину исследований; реже используются взрывные источники. Для сокращения объема работ часто используются точечные зондирования методом преломленных волн (ТЗ МПВ).	Увеличение глубины исследований в связи с изучением месторождений напорных вод требует широкого применения сейсморазведки как КМПВ, так и методом отраженных волн (МОВ). Необходимость ее становится особо настоятельной при тонкослоистом разрезе, когда расчленение последнего с помощью ВЭЗ становится невозможным. Глубинная сейсморазведка требует больших материальных затрат; поэтому объемы ее следует ограничивать путем разумного сочетания с другими методами.

Геофизический метод (или модификация)	Изучаемые поля и параметры	Область применения метода	Примечание
Гравиразведка методами гравиметровых и вариометрических наблюдений	Поле силы тяжести; аномалии силы тяжести Δg и ее вертикальные и горизонтальные производные.	<p>Такая неспециализированная методика недостаточно эффективна. Регистрация продольных, поперечных и других типов волн при различной частоте колебаний, изучение не только кинематических, но и динамических характеристик — все это резко расширяет возможности сейсморазведки, позволяя перейти от геометрической к физической характеристике среды.</p> <p>При изучении скальных пород гравиметрия направлена на прослеживание зон разломов и крутых контактов пород, выявление основных структурно-формационных зон фундамента, обнаружение крупных карстовых полостей. При исследовании рыхлых пород гравиметрия может быть использована для оконтуривания участков распространения пород повышенной плотности (галечников, конгломератов) среди песчано-глинистых более легких образований, при определении мощности рыхлых образований, залегающих на скальном образовании; для оценки плотности и пористости пород. Эти задачи воз-</p>	При прослеживании древних погребенных долин необходимо использовать высокоточные гравиметрические наблюдения.
Магниторазведка обычной и повышенной точности	Магнитное поле Земли; аномалии вертикальной составляющей его напряженности (или полный вектор напряженности), ΔZ , ΔT (или T).	<p>никают при выявлении древних погребенных долин и изучении межгорных впадин. Исследование межгорных впадин гравиметрическим методом в сочетании с глубинными ВЭЗ, как правило, позволяет избежать дорогостоящих сейсморазведочных работ.</p> <p>Магниторазведку обычной точности следует применять при неглубоком залегании фундамента, сложенного магнитоактивными породами (для геологического его картирования, выявления зон разломов), при изучении межгорных впадин (для оконтуривания участков глубокого и мелкого залегания фундамента) и т. п. Микромагнитную съемку используют для выявления среди осадочных пород грубообломочных отложений и определения генерального направления трещиноватости [32 и др.].</p>	При неглубоком залегании изучаемых пород магниторазведка обычно сопровождается ЭП.
Термометрия (в полевом варианте)	Тепловое поле Земли; температура t .	Ограниченно применяется при поисках и разведке пресных вод; обычно используется в комплексе с резистивметрией для выявления зон разгрузки подземных вод [1, 4, 23 и др.]; обязательно сопутствует геокриологическим исследованиям.	

ляют и съемки по территории артезианских бассейнов, поскольку позволяют судить о глубине залегания, тектонике и литолого-петрографическом составе пород фундамента; по материалам аэромагнитных съемок хорошо прослеживаются зоны крупных разломов.

Результаты аэрорадиометрических съемок способствуют геологическому картированию территории. По их данным можно выделить участки глинистых пород, отделив их от пород существенно песчанистого состава, оконтурить кислые интрузии и т. п.

В целом геофизические методы второй группы дают гидрогеологу полезную, хотя и недостаточно полную информацию.

Комплексирование геофизических методов. Установление рационального (или оптимального) комплекса геофизических методов является кардинальным вопросом методики геофизической разведки [12, 20, 22, 40 и др.]. Необходимость использования нескольких методов обусловлена рядом причин; а) неоднозначностью интерпретации результатов отдельных методов; б) невозможностью решения всех поставленных задач лишь одним методом; в) экономическими соображениями, когда высокоэффективные, но дорогостоящие исследования требуется сочетать с менее эффективными сравнительно недорогими работами.

Поскольку эффективность и стоимость работ значительно различаются, ставится вопрос о рациональном комплексировании геофизических методов между собой и о комплексировании этих методов в целом с гидрогеологическими, ландшафтными и другими исследованиями. Рациональным комплексом геофизических методов большинство специалистов называют такое их сочетание, которое при минимуме проверочных геологических работ обеспечивает наиболее достоверное решение поставленных задач с наименьшими затратами и в кратчайший срок. К основным факторам, определяющим выбор рационального комплекса исследований, следует отнести: 1) стадию, задачи исследований и требования к точности и надежности их решения; 2) природные глубинные, приповерхностные и поверхностные условия, определяющие эффективность работ; 3) технический уровень гидрогеологических, ландшафтных и других работ, выполняемых параллельно с геофизическими, их геолого-экономическую эффективность в решении задач, изучаемых также геофизическими методами.

Гидрогеологическая практика позволяет установить некоторые общие закономерности, которые необходимо учитывать при выборе рационального комплекса геофизических методов: 1) чем проще природные условия, чем благоприятнее и однороднее геолого-геофизическая обстановка, тем более однотипными являются полевые исследования и тем проще задача выбора рационального комплекса; 2) соблюдение стадийности

исследований от региональных (прогнозных) до поисковых и разведочных обеспечивает наиболее правильный выбор рационального комплекса; 3) на всех этапах исследований должно осуществляться многократное чередование геолого-гидрогеологических, ландшафтных и геофизических исследований; это обеспечивает их увязку и облегчает комплексную интерпретацию; 4) при выборе комплекса методов необходимо ориентироваться не на одну, а на серию задач, решение которых может во всей полноте охарактеризовать гидрогеологическую обстановку.

Комплексирование можно производить по нескольким схемам: а) решая одну задачу несколькими методами, б) независимо решая каждую из задач отдельными геофизическими методами; в) строя решение одной задачи на базе решения других. Возможно и разнообразное сочетание названных схем. Наиболее эффективным является третий путь. Здесь в наибольшем объеме используется информация каждого метода.

Во всех видах работ, на всех этапах исследований необходимо сочетать наземные и скважинные методы геофизических наблюдений. Последние служат прежде всего основой для наземных. Но не все задачи с требуемой точностью можно решить только наземными геофизическими методами. Чем больше детальность исследований, тем выше требования к их достоверности, тем большее место в общем комплексе геофизических работ занимают скважинные исследования. Обычно при переходе к детальной разведке подземных вод каротаж становится единственным методом геофизических исследований.

Имеются два пути выбора рационального комплекса: экспериментальный и расчетный. Первый путь широко распространен во всех отраслях геофизической разведки и основан на вероятностно-статистическом анализе большого опыта полезных геофизических работ в сходных природных условиях. Методом «проб и ошибок» (с определенными коррективами на те или иные изменившиеся технические требования и возможности) вырабатывается рациональный комплекс. Недостатки способа заключаются в необходимости изучения огромной информации и известной субъективности решений. Второй путь базируется на применении математических методов анализа, в частности, теории информации (возможно, и теории игр), с помощью которых количественно оценивается вклад как каждого геофизического метода, так и их совокупности в решении поставленных задач. Однако сложность решения не позволяет все выводы обосновывать математически.

Сеть геофизических наблюдений. Сеть должна обеспечить с требуемой точностью (достоверностью) при минимальных затратах решение поставленных гидрогеологических задач. В производственных условиях, как правило, используется эмпирический подход. Выбор сети в гидрогеологии сложнее, чем в других отраслях: обилие задач, необходимость изучения не только

геометрии, но и физических параметров среды, строгие экономические ограничения — все это затрудняет выбор оптимальной сети наблюдений. Густота и конфигурация ее определяются: требованиями к точности и детальности результатов; степенью однородности геологических, гидрогеологических и геофизических условий и размерами изучаемых объектов; проходимостью местности; точностью полевых геофизических наблюдений; совершенством методики интерпретации.

Чем выше требуемая точность и больше детальность, тем гуще должна быть сеть наблюдений. Таким образом, масштаб результативных карт и разрезов в значительной мере определяет сеть наблюдений.

Чем однороднее геологические, гидрогеологические и геофизические условия, чем крупнее исследуемые объекты, тем реже должна быть сеть наблюдений. Изучение изометричных объектов требует равномерной сети наблюдений, четко вытянутые объекты исследуются по серии субпараллельных профилей и маршрутов, расстояние между которыми в 3—5 раза, иногда и больше, чем шаг наблюдений вдоль профилей.

Часто сеть наблюдений приходится сгущать, когда разрез крайне неоднородный и при редкой сети невозможна непрерывная корреляция геофизических аномалий от одного пункта к другому. Однако (особенно при использовании метода ВЭЗ) необходимо остерегаться чрезмерного сгущения наблюдений, ориентированных на значительную глубину исследований: в сложных условиях иногда целесообразно сгущать сеть наблюдений за счет пунктов с небольшой глубинностью (в частности, заполняя интервал между ВЭЗ с большими разносами ВЭЗ с малыми разносами).

В настоящее время в гидрогеологической практике используется несколько приемов определения оптимальной сети наблюдений: 1) метод аналогий, 2) метод разрежения сети, 3) метод автокорреляции аномалий, 4) метод выявления случайно расположенных аномалиеобразующих тел, 5) метод построения карт заданных масштабов и сечений изолиний.

Метод аналогий заключается в сравнении геологических условий исследуемого объекта с условиями других хорошо изученных объектов. Для уменьшения субъективных ошибок берутся усредненные (среднестатистические) результаты по серии близких по своим условиям и задачам объектов. Метод широко применяется на практике. Использован он и в настоящей работе.

Метод разрежения сети состоит в том, что имеющуюся сеть наблюдений постепенно разрежают и проводят заново геофизическую интерпретацию. При правильном подходе этот способ позволяет решить задачу в случае, когда имеющаяся сеть наблюдений заведомо была более густой, чем это требовалось. Использование ЭВМ (формализованным способом выполняю-

шей интерпретацию ВЭЗ, построение карт в изолиниях и т. п.) в определенной мере позволяет исключить элементы субъективизма.

Метод автокорреляции аномалий удобно использовать, когда применяются разного рода профильные детальные наблюдения в целях прослеживания контактов, зон разломов и т. п. (В. И. Аронов, 1977 г.). Определение межпрофильного радиуса корреляции R и является решением задачи.

В основе метода выявления случайно расположенных аномалиеобразующих тел требуемых размеров лежит известное в геологии правило: каждая представляющая интерес для данной съемки геофизическая аномалия должна быть пересечена не менее, чем одним-двумя профилями, и зафиксирована одной-двумя точками на каждом профиле.

В настоящее время разработаны приемы расчетов сети наблюдений с учетом вероятностно-статистических методов. Для этого нужно знать примерную форму аномалиеобразующих тел, их физические свойства и требования к вероятности встречи искомым объектам. Такой прием целесообразно использовать при поисковых работах, когда необходимо выявить перспективный участок. При этом следует учитывать дополнительный объем наблюдений, связанный с влиянием помех, мешающих корреляции разрозненных наблюдений.

Метод обоснования сети наблюдений для построения карт требуемых масштабов и сечений изолиний широко распространен при построении карт рельефа маркирующей поверхности, гравиметрических карт и т. п. В этом методе на основе теоретических и экспериментальных данных связываются между собой в формуле (таблице или графике) следующие показатели: а) точность измеренного параметра, б) сечение между изолиниями результативной карты, в) расстояние между пунктами наблюдений, г) сложность изучаемого поля.

На практике при решении серии задач обычно приходится принимать компромиссные решения. Желательно при этом использовать несколько способов расчета с последующей проверкой и корректурой принятых решений на основе полевого эксперимента.

Параметрические наблюдения. Такие наблюдения необходимы для обоснования геологической и гидрогеологической интерпретации геофизических аномалий. Обычно их производят у хорошо опробованных скважин, глубоких шурфов и др. Количественные соотношения между геофизическими и гидрогеологическими параметрами пород устанавливаются либо эмпирическим, либо расчетно-экспериментальными методами [8]. Эмпирический метод состоит в том, что на основании экспериментальных данных устанавливаются корреляционные связи непосредственно между геофизическими параметрами и показателями свойств пород. Другой подход основан на теоретиче-

ском анализе некоторых модельных сред, в той или иной мере отражающих реальные свойства пород, и последующей тарировке экспериментальных геофизических данных на основе полученных теоретических зависимостей. Такой подход позволяет более полно проследивать общие закономерности связей геофизических характеристик с показателями свойств пород. Преимущество его также в том, что экспериментальные данные нужны здесь лишь для проверки расчетных, и поэтому их объем может быть небольшим. При установлении рассматриваемых связей необходимо пользоваться «истинными» геофизическими параметрами. Привлечение «кажущихся» величин чрезвычайно ограничивает возможности геофизических методов [8].

2.2. ПРИНЦИПЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

При гидрогеологических исследованиях интерпретация геофизических материалов производится в соответствии с существующими руководствами и методическими пособиями. При этом необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства:

а) задачей интерпретации геофизических полей являются изучение геометрии среды, определение ее гидрогеологических характеристик и параметров и исследование гидрогеологических процессов (например, вертикальной фильтрации подземных вод сквозь водоупор);

б) интерпретация может быть качественная (сравнительная) и количественная. Там, где возможна количественная интерпретация, ее необходимо выполнять, строго соблюдая известные положения теории;

в) интерпретация геофизических материалов ведется в несколько этапов: в целях прогнозирования гидрогеолого-геофизических условий первоначально анализируются готовые материалы (по съемкам прежних лет); в процессе полевых работ проводится текущая интерпретация, если геофизические наблюдения ведутся с опережением буровых работ, осуществляется предварительная интерпретация; после выполнения всего цикла работ осуществляется окончательная интерпретация;

г) выявленные корреляционные (или функциональные) зависимости между геофизическими и гидрогеологическими параметрами служат основой гидрогеологической интерпретации. Необходимо также определять влияние на геофизические аномалии факторов, мешающих обнаружить искомые связи. Отсюда следует необходимость многофакторного анализа;

д) окончательные результаты интерпретации должны представляться в виде гидрогеологических карт и разрезов. Эти документы составляются на основе совместного анализа гидрогеологических, геофизических и других материалов.

Интерпретацию можно подразделить на два этапа: собственно геофизическую интерпретацию и гидрогеологическую интерпретацию. Не всегда удается провести четкую грань между названными этапами, тем не менее разница между ними достаточно ощутима. Геофизической интерпретацией можно назвать расчленение изучаемой геологической среды на отдельные тела, ограниченные определенными геометрическими поверхностями и характеризующиеся геофизическими параметрами. Гидрогеологическая интерпретация эти тела трансформирует в гидрогеологические объекты — пласты, горизонты и т. п. и наделяет их конкретными геологическими и гидрогеологическими параметрами, характеризующими как их геометрию, так и водно-физические свойства.

В гидрогеологической геофизике примерно с конца 60-х годов ведутся разработки по расширению применения математических методов и внедрению электронно-счетной техники. Этими исследованиями уже охвачены многие направления. Сюда следует отнести создание А. Н. Огильви общей теории физических и геологических полей [24]; построение карт в изолиниях и первые элементы тренд-анализа [24]; решение прямой и обратной задач интерпретации ВЭЗ и зондирований ВП в специальных условиях гидрогеологических исследований [10, 36, 37]; использование методов математической статистики для выявления корреляционных связей между геофизическими и гидрогеологическими и геологическими параметрами [15, 20, 42]; специальная обработка графиков геофизических наблюдений (электропрофилеирования, магниторазведки и др.) с целью выявления слабых аномалий и корреляции их от профиля к профилю (Х. А. Невмянов, 1976 г. и др.); распознавание образа по качественным характеристикам; районирование и классификация объектов [15, 17 и др.]; моделирование гидрогеологических полей по данным геофизической информации [15, 24].

2.3. ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРИЗНАКАМ

Типизация месторождений по геофизическим признакам необходима для правильного выбора методики поисково-разведочных работ. В основу этой типизации целесообразно положить схему, разработанную для гидрогеологических исследований (см. раздел 1). На рис. 9 приводится геофизическая классификация месторождений в сопоставлении с гидрогеологической. Имеются известные различия в этих классификациях, связанные со спецификой геофизических работ. Наиболее важным определяющим фактором в геофизических работах являются литологический состав и физическое состояние изучаемых пород, что позволяет выделить три основные группы месторождений, приуроченных к породам: а) рыхлым; б) скальным трещиноватым; в) многолетнемерзлым (рыхлым и скальным).

3. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЫХЛЫХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОДАХ

3.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ

К рыхлым песчано-глинистым отложениям приурочено большинство эксплуатируемых месторождений пресных подземных вод. Последние обычно концентрируются в грубообломочных породах: средне- и крупнозернистых песках, гравийно-галечниковых и валунных образованиях. По особенностям гидрогеологических условий и специфике геофизических характеристик в рассматриваемой группе можно выделить пять типов месторождений (см. рис. 9). Существенный вклад в совершенствование методики исследований этих месторождений полевыми геофизическими методами внесли работы В. А. Богословского, А. М. Бобринева, В. В. Галогана, Н. Н. Горяинова, И. Д. Зимкина, А. А. Огильви, Н. А. Огильви, Ю. А. Осянина, И. Я. Першина, В. А. Ряполовой, А. Д. Судоплатова, Н. Н. Шарпанова, Ю. В. Якубовского, З. Г. Яценко и др.

Основной задачей геофизических исследований на стадии поисков является оконтуривание участков, в пределах которых распространены на практически доступной глубине породы, насыщенные пресными подземными водами, отличающиеся максимальной водообильностью и обладающие значительными запасами этих вод. На стадии предварительной разведки детально изучается геологическая и гидрогеологическая характеристики перспективных участков. Для решения перечисленных задач в основном применяется электроразведка, меньше — сейсморазведка и совершенно незначительно — гравиразведка, магнито-разведка и термометрия.

Уделим основное внимание тем задачам, которые необходимо решить для большинства месторождений подземных вод в рыхлых образованиях. Некоторые узкие специфические вопросы более подробно рассмотрим при анализе методики исследований отдельных типов и разновидностей месторождений.

Решение общих геологических задач. В решение задач входит: определение мощности рыхлых отложений, залегающих на массивных породах; выявление и прослеживание древних погребенных долин; расчленение разреза рыхлых терригенных пород на отдельные литологические горизонты и картирование их по площади; прослеживание зон разломов.

Определение мощности рыхлых отложений, залегающих на массивных породах. Массивные породы могут быть сложены карбонатно-галогенными, кристаллическими и другими поро-

дами. Задача разрешается методами ВЭЗ, ЗСБЗ, ЭП, сейсморазведкой МПВ, КМПВ или МОВ, гравиразведкой, иногда магниторазведкой.

Обычно рыхлые отложения отличаются электрическим сопротивлением на один-два порядка ниже, чем сопротивление подстилающих их массивных пород. При использовании метода ВЭЗ наилучшие результаты отмечаются, когда рыхлые отложения залегают на слаботрещиноватых кристаллических или карбонатных породах. Например, в условиях Русской платформы погрешность в определении мощности пород верхнего терригенного комплекса (J_2-Q), залегающего на карбонатно-галечных породах РЗ, варьирует от 5—10 до 20—30 %. Вместе с тем имеются участки, где погрешность интерпретации ВЭЗ резко возрастает. Они наблюдаются: а) когда высокоомные пески расположены в верхней части разреза или непосредственно на карбонатно-галогенных или терригенных уплотненных породах палеозоя, б) при наличии сильно выветрелых или трещиноватых, обогащенных глинистыми образованиями карбонатных пород, либо при насыщении их высокоминерализованными водами, в) в окраинной зоне Московской и других синеклиз, где под покровом рыхлых пород залегают серия сменяющих друг друга погружающихся горизонтов, когда невозможна уверенная корреляция результатов ВЭЗ.

Ряд трудностей возникает иногда при определении глубин до складчатого основания, сформированного в герцинский и другие более молодые геотектонические циклы. Например, на юге Приташкентского района палеозойские сланцы, слагающие здесь складчатое основание, по электрическому сопротивлению практически не отличаются от рыхлых мезокайнозойских пород.

При небольшой мощности рыхлых отложений (первые десятки метров) и сравнительной их однородности можно использовать электропрофилирование в комбинации с ВЭЗ по более редкой сети наблюдений (М. И. Пахомов, 1972 г.), если сокращение объема ВЭЗ не препятствует параллельному решению других гидрогеологических задач.

Сейсморазведка при оценке мощности рыхлых пород дает наиболее уверенные результаты. Обычно погрешность определения мощности составляет 3—5 %. При сравнительно малых глубинах применяют МПВ или КМПВ, при больших (200—300 м и более) — КМПВ и МОВ.

При определении мощности рыхлых отложений глубоких межгорных впадин используются ВЭЗ, КМПВ, МОВ, гравиразведка. Решение этой задачи позволяет попутно изучить тектонику впадин и выяснить другие вопросы, важные для гидрогеологических исследований. Особенно часто приходится сочетать ВЭЗ и гравиразведку. Дело в том, что интерпретация ВЭЗ в связи с малым числом опорных скважин и наблюдающейся нечеткостью геоэлектрической дифференциации рыхлых образо-

ваний и пород основания часто становится неоднозначной. Результаты гравиметрии компенсируют этот дефект. Следует иметь в виду, что в условиях глубоких впадин интерпретация гравиметрических данных из-за увеличения плотности рыхлых пород с глубиной и других осложнений требует привлечения специальных приемов [15]. В других случаях метод ВЭЗ сочетают с сейсморазведкой, проводимой по редкой сети профилей. В одних бассейнах наилучшие результаты дает КМПВ (например, в Забайкалье), в других — МОВ (межгорные впадины Киргизии). Иногда для приближенной оценки мощности рыхлых отложений впадин можно использовать данные магниторазведки. Результаты количественной интерпретации ее недостаточны для изучения рельефа впадин, однако качественная характеристика магнитного поля позволяет уточнить контуры впадин и выделить участки мелкого и глубокого залегания фундамента (по характеру интенсивности и контрастности магнитных аномалий).

Выявление и прослеживание древних погребенных долин. При решении этой задачи используются метод ВЭЗ, в меньшей мере электропрофилирование, сейсморазведка и гравиразведка, причем методические приемы интерпретации близки приемам оценки мощности рыхлых отложений (см. раздел 3.2).

Расчленение разреза рыхлых терригенных пород на отдельные литологические горизонты. Поскольку при расчленении разреза обычно грубообломочные породы отделяются от тонкообломочных, одновременно решается задача выделения водоносных и водоупорных толщ. Применяются методы ВЭЗ, электропрофилирование, ВЭЗ-ВП, сейсморазведка и др. Остановимся на исследованиях, охватывающих сравнительно малые глубины, до 100—300 м.

При использовании метода ВЭЗ обязательным условием является сопоставимость мощности исследуемого горизонта с глубиной его залегания. Наиболее четко прослеживается контакт песчано-гравийно-галечниковых отложений с подстилающими и перекрывающими их глинистыми образованиями. С другой стороны, с известной степенью условности можно разделить грубообломочные отложения на две основные категории: а) грубообломочные породы с глинистым заполнителем и б) те же породы с песчаным заполнителем или без него. Погрешность в оценке мощностей тех или иных литологических разностей значительная и, видимо, измеряется десятками процентов. ВЭЗ применяется обычно для расчленения разреза по вертикали. Если же требуется выявить изменение состава пород по площади, особенно при небольшой их мощности, целесообразно применять электропрофилирование с опорой на редкую сеть ВЭЗ и горных выработок.

Расчленение разреза рыхлых отложений на отдельные горизонты может эффективно осуществляться с помощью сейсмо-

разведки КМПВ. Например, на разных участках Московского артезианского бассейна в терригенном комплексе прослеживаются преломляющие границы по кровле моренных суглинков Q , мергельно-меловых пород K_2 , глин и песчаников J .

В настоящее время большое внимание уделяется методу вызванных потенциалов в модификации ВЭЗ-ВП при литологическом расчленении песчано-глинистых отложений, особенно, когда эта задача плохо решается с помощью метода ВЭЗ [31, 42 и др.]. Положительных результатов удалось добиться в центральных районах Русской платформы, в Белоруссии, Калмыкии и др. Изучена преимущественно поляризуемость η , в меньшей мере — постоянная времени τ . Глубина исследований не превышает 50—100 мм.

Прослеживание зон разломов. Для решения этой задачи обычно требуется изучение консолидированных пород, образующих фундамент, складчатое основание и т. п. Подробно вопрос рассматривается при анализе месторождений трещинно-жильного и трещинно-карстового типов.

Гидрохимические исследования. Изучение химического состава подземных вод геофизическими методами может быть сведено к оконтуриванию пресных вод среди минерализованных и, наоборот, выявлению участков с минерализованной водой среди участков, насыщенных пресными водами; к оценке степени минерализации подземных вод; к определению мощности зоны пресных вод. Наиболее широко используются методы электроразведки. В сложных природных условиях этот метод комплексируется с другими, а в особо трудных ситуациях приходится переходить от прямого определения минерализации к качественным (сравнительным) оценкам по косвенным признакам.

Оконтуривание участков с пресной и соленой водой, оценка степени минерализации подземных вод. Решение этой задачи осуществляется при исследовании линз пресных вод пустыни, краевых частей конусов выноса, глубоко врезанных древних русел рек и др. [13, 15, 16, 20, 25, 42]. На практике применяются три основных способа: 1) резистивиметрические наблюдения, на основе которых устанавливается электрическое сопротивление воды; 2) определение геофизических параметров пород, тесно связанных с минерализацией насыщающих их подземных вод (электрическое сопротивление, естественная и вызванная электрическая поляризация пород); 3) косвенная оценка гидрогеологических условий, влияющих на изменение минерализации подземных вод, на базе интерпретации всей совокупности геофизических данных.

Резистивиметрические наблюдения могут осуществляться лишь при возможности проведения замеров непосредственно в водной среде. Глубинность этих исследований (в полевом варианте), когда отсутствуют глубокие горные выработки, совер-

шенно незначительная. Электрическое сопротивление растворов низкой концентрации ρ_0 мало различается для ряда солей. Это позволяет рассчитать ρ_0 по величине общей минерализации M и подвижности ионов преобладающего в природных водах электролита — обычно NaCl [25]; и, наоборот, по величине ρ_0 можно определить M . В тех случаях, когда преобладающим становится какой-то другой электролит (а это выясняется с помощью гидрохимического опробования), необходимо при оценке вводить поправочные коэффициенты, зависящие от химического класса вод; максимальный коэффициент может достигать 1,4 (М. П. Бейсова, 1975 г.).

Электрическое сопротивление воды зависит также и от температуры. При резистивиметрических наблюдениях все замеры приводят к одной температуре t , равной $+20$ или 18°C [11]:

$$\rho_{t_{20^\circ}} = \rho_t [1 + 0,025(t - 20^\circ)].$$

А. А. Огильви, В. А. Богословский и др. [23] рекомендуют резистивиметрию и термометрию производить совместно; кстати, сами по себе термометрические замеры позволяют иногда решать задачи, аналогичные тем, что решает резистивиметрия.

Резистивиметрия является чрезвычайно эффективным простым массовым методом, способствующим решению многих задач [23 и др.]. Например, изучение величины ρ_0 вдоль рек, ручьев и других водоемов способствует обнаружению зон разломов [16, 23]. А. А. Огильви [22], проводивший исследования в горной части Большого Кавказа, показал, что сопротивление ρ_0 можно также использовать для изучения генезиса поверхностных вод, поскольку ледниковые, речные, озерные воды заметно отличаются по величине минерализации, а режимные наблюдения позволяют выявить зависимость между сопротивлением ρ_0 и расходами поверхностных и подземных вод. Установлено, что подземные воды различных горизонтов отличаются по своему сопротивлению ρ_0 . Это способствует гидрогеологическому картированию.

Эффективность исследований резко увеличивается, когда минерализацию подземных вод оценивают на базе вызываемых ею изменений геофизических параметров среды, в первую очередь электрического сопротивления. Метод сопротивлений основан на прямой пропорциональности электрического сопротивления пород $\rho_{\text{п}}$ сопротивлению насыщающих их подземных вод ρ_0 в значительном интервале минерализации:

$$\rho_{\text{п}} = P\rho_0,$$

где P — относительное сопротивление, обусловленное составом скелета породы, пористостью, извилистостью каналов и т. п.

Таблица 2

Порода	$k_{п}, \%$					
	4	6	10	20	40	60
Песок	—	—	30	9	6	1
Среднецементированный песчаник, рыхлый известняк	500	110	60	12	6	1
Плотный песчаник, известняк, доломит	1000	400	100	20	7	1

Средние значения P для однородных пород в зависимости от их состава и пористости $k_{п}$ приведены в табл. 2 [11]. Чем меньше величина P , тем в большей мере $\rho_{п}$ зависит от ρ_0 и тем точнее можно оценить минерализацию M . Наилучшие результаты получаются при изучении чистых однородных песков.

А. А. Огильви (1955 г.) одним из первых обосновал и практически доказал возможность оценки минерализации M по данным электроразведки. Зная примерную пористость песков $k_{п}$ (по гидрогеологическим данным) и определив их сопротивление $\rho_{п}$, А. А. Огильви по графикам В. Н. Дахнова [34] оценивал величины P и $\rho_0 = \rho_{п}/P$, а затем по зависимости $\rho_0(M)$ пересчитывал ρ_0 в минерализацию M . А. Д. Судоплатов [39] усовершенствовал этот прием, выявляя по серии скважин величину P (определив $\rho_{п}$ по ВЭЗ у этих скважин, а ρ_0 — по данным электрокаротажа или путем расчета по величине M , устанавливаемой по результатам химических анализов воды); далее значение P распространялось на всю площадь разведки; с помощью электроразведки требовалось лишь определить $\rho_{п}$ требуемого горизонта. Другие исследователи стали по имеющимся гидрогеологическим скважинам непосредственно находить связь $\rho_{п}(M)$ [15, 20 и др.], распространяя ее на исследуемую площадь, либо районируя территорию исследований по каким-то однородным площадям, для каждой из которых применялась соответствующая связь $\rho_{п}(M)$.

Рассмотренные приемы определения M дают в благоприятных природных условиях вполне удовлетворительные результаты: погрешность составляет примерно 20—25%. Благоприятными условиями являются: стабильность состава водовмещающих пород, представленных преимущественно песчано-гравийными отложениями (без глинистых прослоев); значительная мощность изучаемой толщи; ограниченный интервал изучаемой минерализации подземных вод (от 0,5—1 до 5, реже 10 г/л).

Корреляционные зависимости $M(\rho_{п})$ для различных районов достаточно однотипны и в билогарифмическом масштабе могут выражаться в первом приближении уравнением семей-

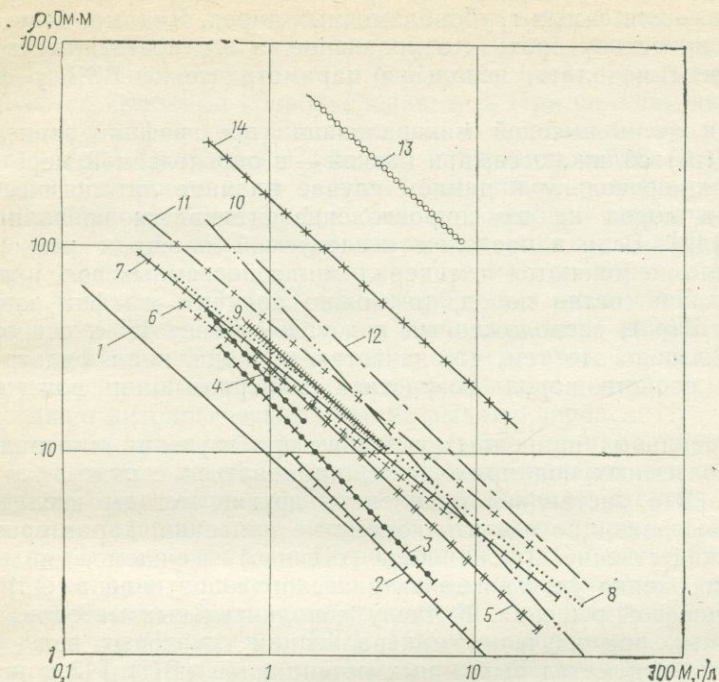


Рис. 10. Графики усредненной зависимости удельного электрического сопротивления пород ρ от минерализации насыщающих их вод M по различным районам Советского Союза.

1 — зависимость $\rho(M)$ для карстовых вод района г. Дзержинска (И. А. Брашнина, 1976 г.); зависимость $\rho(M)$ для терригенных пород: 2 — Южно-Мангышлакская впадина, песчано-глинистые породы К (Ю. А. Осянин, 1970 г.); 3 — Сырдарьинский артезианский бассейн, песчано-глинистые породы К (И. М. Мелькановичкий, 1979 г.); 4 — Заволжье, пески с прослоями глин хазарского яруса (Г. М. Бузинов, 1959 г.); 5 — Предгорье Восточного Копет-Дага, песчано-гравийные отложения краевых частей конусов выноса (В. В. Галаган, 1972 г.); 6 — юго-западная часть Западно-Сибирской низменности, песчано-глинистые отложения P_3-Q (В. А. Кузнецов, Л. П. Латышева, 1973 г.); 7 — Тургайский прогиб, песчано-глинистые отложения P_1-Q (В. Ф. Сомов, А. П. Чиркин, 1970 г.); 8 — Сырдарьинский артезианский бассейн, преимущественно пески N_2-Q (Н. Н. Горленко, 1977 г.); 9 — Павлодарская впадина, пески К (Ю. А. Осянин и др., 1973 г.); 10 — Чуйская впадина, песчано-гравийные отложения N_2-Q (Н. Н. Шараланов и др., 1975 г.); 11 — Вилюйская впадина, пески таликовых зон (Т. Я. Карпенко, 1976 г.); 12 — Кура-Араксинская низменность, песчано-гравийные отложения N_2-Q (А. Л. Шахназарян, 1971 г.); 13 — Северная Фергана, гравийно-галечниковые отложения конусов выноса (В. Е. Квон, 1973 г.); 14 — зависимость $\rho(M)$ для трещиноватых закарстованных известняков Московского артезианского бассейна и северной окраины Донбасса (И. М. Мелькановичкий, А. Ф. Молярь, А. А. Нагоша, 1971—1977 гг.).

ства прямых линий, пересекающих под углом в 45° к оси координат (рис. 10);

$$\lg M = \lg A - \lg \rho_n,$$

где $\lg A$ — постоянная величина, определяемая литологическим составом пород. Наиболее близко к началу координат расположена линия, характеризующая зависимость степени минерализации от сопротивления для водных растворов, наиболее

далеко — для самых грубообломочных пород. Видимо, целесообразно за основу брать это уравнение, а его постоянные коэффициенты находить, используя параметрические ВЭЗ у скважин.

При очень высокой минерализации все графики зависимости $M(\rho_{\text{п}})$ сближаются, при низкой — в определенной мере расходятся, поскольку в данном случае влияние литологического состава пород на их сопротивление становится превалирующим [42]. Если в пределах исследуемой площади резко, но непрерывно меняются и минерализация подземных вод, и литологический состав пород, то можно получить график зависимости $M(\rho_{\text{п}})$, расположенный под углом менее 45° к оси ординат. Вызвано это тем, что зачастую с ухудшением фильтрационных свойств пород возрастает минерализация подземных вод.

В реальных природных условиях при изучении минерализации подземных вод приходится сталкиваться с рядом затруднений. Это заставляет привлекать другие методы исследований, позволяющие изучать косвенные признаки, характеризующие качественно (реже количественно) изучаемое явление. Однако оценка удельного электрического сопротивления остается этом основой решения. К числу дополнительных методов, применяемых при изучении минерализации грунтовых вод¹, следует отнести метод вызванных потенциалов (ВП) [42 и др.] и сейсморазведку [15]. Важную дополнительную информацию можно получить при изучении: а) рельефа местности и других ландшафтно-индикационных признаков [25]; б) литологического состава пород зоны аэрации; в) мощности зоны аэрации и гипсометрии зеркала грунтовых вод; г) литологического состава и фильтрационных свойств водоносных пород; д) особенностей строения более глубоких горизонтов участка.

Комплексирование ландшафтных и геофизических методов при изучении минерализации грунтовых вод, особенно в пустынных областях, получило широкое распространение. Хорошо известны особенности растительного покрова в естественных природных условиях в зависимости от уровня и минерализации грунтовых вод. Рельеф местности также находится в тесной связи с этими показателями. Установлено, например, что подпесчаные линзы пресных вод приурочены к крупным барханам, отличающимся увеличением абсолютных отметок местности, напротив, подтакрыные и прирусловые линзы пресных вод совпадают с отрицательными формами рельефа (В. Н. Фомин и др., 1972 г.).

Литологический состав пород зоны аэрации существенным образом влияет на минерализацию грунтовых вод. Наличие чи-

¹ Вопрос об изучении глубоких артезианских вод рассматривается отдельно в разделе 3.6.

стых песков в зоне аэрации пустынных и полупустынных областей сопутствует пониженной минерализации циркулирующих здесь грунтовых вод [15 и др.]. Чистые пески зоны аэрации отмечаются высокими сопротивлениями ρ . При наличии пылеватых глинистых частиц в их составе и засолении пород зоны аэрации ее сопротивление заметно снижается, и под ней, как правило, распространены воды повышенной минерализации. Таким образом, электроразведкой по методу сопротивлений четко отмечаются изменения состава пород зоны аэрации и степени их засоления. Эти же характеристики хорошо фиксируются методом ВП [42]. Сейсморазведка позволяет судить по изменению величины скорости в породах зоны малых скоростей о примерном ее литологическом составе. По-видимому, и высокоточная (квантовая) магниторазведка может дать представление о литологическом составе рыхлых пород.

Мощность зоны аэрации и гипсометрия зеркала грунтовых вод в условиях развития процессов континентального засоления пород могут служить надежным указателем степени минерализации подземных вод: чем больше мощность зоны аэрации, тем ниже, как правило, минерализация подземных грунтовых вод [15 и др.]. Снижение минерализации зачастую связано с увеличением гидравлического уклона гипсометрической поверхности грунтовых вод [39]. Положение уровня грунтовых вод можно оценить с помощью метода ВЭЗ, сейсморазведки МПВ и др. На кривых ВЭЗ зона аэрации зачастую отмечается максимумом $\rho_{\text{п}}$. По этим кривым можно надежно оценить величину поперечного сопротивления $T_{\text{э}}$, характеризующего породы зоны аэрации. Поскольку $T_{\text{э}} = \rho h$ (где h — мощность пород), можно полагать, что чем выше значение $T_{\text{э}}$ зоны аэрации, тем более вероятно наличие пресных грунтовых вод, и наоборот. Это хорошо подтверждается материалами по Восточным Кызылкумам [15].

Литологический состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород существенным образом влияют на минерализацию подземных вод, а следовательно, и на изучаемые геоэлектрические параметры. Как показали исследования в Сахаре, намечается четкая корреляционная связь между минерализацией подземных вод и дебитом источников, величина которых определяется фильтрационными свойствами пород; аналогичная зависимость установлена для Сырдарьинского района [15]. Одновременные изменения минерализации подземных вод и литологического состава водовмещающих пород резко снижают эффективность электроразведки методом сопротивления. Поэтому для более однозначного решения задачи целесообразно использовать метод ВЭЗ-ВП. Совместная интерпретация кривых $\rho_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{к}}$ позволяет провести районирование территории по литологическому составу пород, что способствует более эффективному использованию метода ВЭЗ для оценки

минерализации. Не исключена возможность непосредственного нахождения корреляционных зависимостей вида $M(\rho, \eta)$ [42].

Изменение минерализации грунтовых вод может происходить также за счет подтока снизу глубинных вод, отличающихся иной минерализацией. Зоны разломов, глубокие врезы древних долин в коренные породы, изменение мощности и литологического состава пород регионального водоупора и т. п. — все это может способствовать активизации гидравлической связи грунтовых и напорных вод [16]. Поэтому глубинные геофизические исследования, направленные в первую очередь на изучение неотектоники, могут оказать существенную помощь при изучении минерализации подземных вод.

Параллельно с прямой и косвенной оценкой величины минерализации подземных вод решается задача оконтуривания по площади участков с пресной (либо минерализованной) водой. Помимо перечисленных выше методов, в благоприятных условиях для прослеживания нужных границ целесообразно применять электропрофилирование. Кроме того, как показали исследования А. С. Семенова (1974 г.), А. А. Огильви и др. [1], можно использовать метод естественного электрического поля (ЕП). В связи с тем, что подвижность отрицательных ионов больше, чем положительных, из соленой воды в пресную первыми диффундируют отрицательные ионы. Поэтому вблизи границы смешения вод различной концентрации над высокоминерализованными водами образуется положительный заряд, а над пресными — отрицательный. Величина аномалий невелика, обычно она не превышает 10 мВ. Вследствие этого метод ЕП трудно использовать в полевых условиях, где значительно влияние разного рода помех, но в условиях водоемов этот метод может дать вполне реальные результаты.

Определение мощности зоны пресных вод. Решение этой задачи осуществляется с помощью метода ВЭЗ на основе анализа электрического сопротивления пород. При наличии однородной песчаной толщи резкое снижение электрического сопротивления с глубиной свидетельствует о соответствующем изменении минерализации подземных вод. Точно границу перехода по ВЭЗ установить трудно, поскольку сопротивление $\rho_{п}$ (вслед за изменением минерализации M) испытывает не скачкообразный, а градиентный переход. Вместе с тем привлечение скважинных наблюдений позволяет за счет введения эмпирических корректив в интерпретацию ВЭЗ уточнить решение. Значительно сложнее установление мощности зоны пресных вод в условиях литологически неоднородного разреза, когда пески, насыщенные минерализованной водой, и глины могут геоэлектрически фиксироваться одними и теми же аномалиями. В таком случае использование результатов бурения или сейсморазведки совместно с данными ВЭЗ позволяет найти однозначное решение.

Характеристика гидродинамических условий. Сюда входит обширный круг вопросов: определение уровня грунтовых и глубины залегания поверхности напорных вод; выявление мест питания и разгрузки подземных вод; выяснение гидравлической связи между водоносными горизонтами, а также между подземными и поверхностными водами; изучение фильтрационных характеристик водоносных и водоупорных толщ.

Определение уровня грунтовых вод. Задача решается методами ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и сейсморазведкой МПВ [8, 22, 42]. Эффективность перечисленных методов резко меняется в зависимости от геологических условий. Изучение глубины до уровня грунтовых вод (УГВ) в терригенных породах с использованием лишь метода ВЭЗ осуществляется зачастую с большой погрешностью. Хотя сухие терригенные породы резко отличаются по электрическому сопротивлению от влажных, геоэлектрический переход от одних к другим, как правило, не скачкообразный, а градиентный. Кроме того, не всегда можно отличить увлажненные пески от глин. Наилучшие результаты по оценке мощности зоны аэрации по ВЭЗ отмечаются на площадях, где распространены мощные отложения аллювиально-флювиогляциальных и эоловых песков. Но в общем случае метод ВЭЗ мало пригоден для самостоятельного решения задачи. Это не исключает его сочетания с сейсморазведкой. Иногда можно разредить сеть сейсмических наблюдений, использовав для более надежной их интерполяции наблюдения по методу ВЭЗ.

Имеется опыт использования КВЭЗ для определения уровня грунтовых вод, когда обычные ВЭЗ мало эффективны. Судя по наблюдениям В. В. Галагана (1976 г.) в Туркмении, искомая глубина до УГВ равна примерно величине разносов $AB/2$, при которых резко меняется ориентировка эллипса анизотропии.

Изредка для определения глубины до УГВ привлекаются данные метода ВЭЗ-ВП. Как установлено, зона аэрации отличается минимальными значениями параметра η_k , начиная же с капиллярной каймы η_k возрастает (И. Д. Зимкин, 1973 г.).

При сейсмических наблюдениях наиболее простым является случай, когда уровень грунтовых вод проходит в песках или песчано-гравийных толщах. Скорость прямой волны, проходящей зону аэрации, в таких случаях составляет 0,25—0,6 км/с, а головной волны v_r , идущей по поверхности УГВ, 1—2 км/с. Погрешность в определении глубин до УГВ составляет 1—1,5 м при мощности зоны аэрации до 20—25 м. Следует иметь в виду, что по сейсморазведке устанавливается не уровень грунтовых вод, а поверхность капиллярной каймы, положение которой определяется фильтрационными свойствами породы. Возможности сейсморазведки ухудшаются, когда грунтовые воды насыщают породы, обогащенные глинистым материалом (суглинки, глинистые пески). В этом случае зона аэрации и зона малых скоростей не совпадают. Однако

использование критериев, основанных на изучении поперечных волн, а также анализ данных неглубоких скважин позволяют сделать интерпретацию однозначной даже в сложных случаях [8].

Установление глубины циркуляции напорных вод. Глубина залегания напорных вод устанавливается по положению подошвы водоупорного горизонта, обычно сложенного глинистыми породами. Если напорные воды обладают низкой минерализацией, то при благоприятном соотношении мощностей задача решается методом ВЭЗ. При увеличенной минерализации напорных вод геоэлектрическая дифференциация водоупора и водоносного горизонта резко ухудшается; при таких условиях задачу можно решить методом ВЭЗ-ВП, либо с помощью сейсморазведки.

Выявление мест питания и разгрузки подземных вод, выяснение гидравлической связи напорных и грунтовых вод. Задача решается с помощью методов ВЭЗ, ЭП, сейсморазведки, ЕП, резистивиметрии и термометрии. По методам ВЭЗ и ЭП можно получить лишь косвенное решение. Например, если напорные воды отличаются повышенной минерализацией, породы в области их разгрузки характеризуются аномально низким электрическим сопротивлением. Особенно часто это наблюдается в долинах рек Русской и Сибирской платформ, глубоко врезанных в коренные породы. Участки гидравлической связи напорных и грунтовых вод можно также прогнозировать на основе структурных построений по данным ВЭЗ или сейсморазведки, в результате которых выявляются гидрогеологические «окна».

Метод ЕП издавна применяется в гидрогеологии для выявления мест питания и разгрузки подземных вод, гидравлической связи грунтовых и поверхностных вод. Однако малая величина фильтрационных потенциалов, связанных с изучаемыми объектами, искажающее влияние рельефа местности, незначительная глубинность и ряд других осложнений делают метод ЕП, за редким исключением, малоэффективным при наблюдениях с земной поверхности. С этой целью в последние годы стала использоваться резистивиметрия в комплексе с ЕП, термометрией и другими методами [4, 23 и др.]. Задача решается путем массовых замеров электрического сопротивления и температуры придонного слоя воды в озерах, руслах рек, в мелких горных выработках и т. п. По слабым повышениям удельного электрического сопротивления и температуры исследуемой воды удается выявить участки разгрузки глубоких подземных вод, оценить степень их минерализации и даже изучить режим подземных вод (по повторным замерам). Дополнительную информацию дают методы ВЭЗ и ЭП, позволяющие изучить литологический состав разреза и выявить гидрогеологические «окна».

Определение фильтрационных свойств водоносных пород. Это наиболее сложная и в то же время особенно важная и ответственная задача полевых геофизических исследований при изучении месторождений подземных вод. Решение ее может быть как чисто качественное (сравнительное) на основе изучения литологического состава пород, так и количественное, например, на базе выявления корреляционных связей фильтрационных и геофизических параметров пород. Основным методом исследований является ВЭЗ, дополняемое иногда сейсморазведкой и ВЭЗ-ВП. Изучение фильтрационных свойств требует предварительного решения всех рассмотренных выше задач и осуществляется на завершающем этапе работ. Методика изучения фильтрационных свойств водоносных пород, представленных песками, гравийно-галечниковыми и валунными отложениями, и пород водоупорных (точнее слабопроницаемых), сложенных преимущественно глинами, суглинками, алевролитами, заметно различается.

Общей закономерностью для песчано-глинистых пород, залегающих ниже уровня грунтовых вод, является увеличение их электрического сопротивления по мере обогащения хорошо проницаемыми разностями — песками, гравием, галечниками, валунами. При стабильной минерализации подземных вод, там, где максимальное сопротивление пород сочетается с увеличенной мощностью их, можно обнаружить участки наибольшей водообильности [22]. Указанная закономерность нарушается с появлением в разрезе уплотненных (литифицированных) и иных пород, отличающихся высоким сопротивлением и плохими фильтрационными свойствами (например, хорошо сцементированных конгломератов); во избежание ошибок следует тщательно изучать разрез, используя для этого комплекс полевых и скважинных геофизических методов.

С начала 60-х годов делаются попытки количественно связать величину сопротивления ρ , устанавливаемую полевыми геофизическими методами, с коэффициентом фильтрации K_f пород. Теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют, что на корреляционную связь $K_f(\rho)$ влияют многие факторы: крупность и форма зерна обломочных пород, минерализация подземных вод, общая пористость и конфигурация порового пространства, температура пород, состав цемента и т. п. Поэтому в общем виде нельзя решить задачу только по данным ВЭЗ. Однако при изучении ограниченного объема геологической среды не все перечисленные характеристики испытывают резкие изменения. В частности, температура пород, их литификация и некоторые другие показатели практически остаются стабильными. Некоторые из указанных факторов взаимосвязаны, что способствует более резкому проявлению искомой связи. Например, обогащение разреза глинистым материалом способствует снижению ρ и ухудшению

фильтрационных свойств пород. Происходящее при этом снижение скорости фильтрации подземного потока приводит к увеличению минерализации пластовых вод, что еще в большей мере обеспечивает снижение электрического сопротивления пород. Таким образом, иногда можно эмпирически выявить корреляционную связь $\rho(K_{\phi})$. Обычно наблюдается монотонное увеличение K_{ϕ} вместе с ρ . Однако для галечников в ряде случаев фиксируется максимум на кривой $\rho(K_{\phi})$, после чего отмечается обратная зависимость ρ от K_{ϕ} . Возможно это вызвано цементацией пород известковистым материалом. Такая картина наблюдается в конусах выноса Южной и Северной Ферганы (И. М. Мелькановицкий, 1951 г., И. Д. Зимкин, 1972 г.) в аллювиальных отложениях Южного Буга (М. Н. Байсарович, 1978 г.) и других местах.

В последние годы для сравнительной, а в отдельных случаях и полуколичественной оценки водопроводимости пород, насыщенных грунтовыми либо напорными водами, стала привлекаться величина поперечного электрического сопротивления $T_{\phi} = \rho h$ (где h — мощность изучаемого горизонта или комплекса). Поскольку имеется определенная связь величин ρ и K_{ϕ} , можно полагать, что значения поперечного электрического сопротивления T_{ϕ} и водопроводимости $Km = K_{\phi}m$ (где m — эффективная мощность водоносного горизонта) также взаимосвязаны. Наиболее водообильные участки с максимальными значениями Km должны проявляться на геофизических картах в виде максимумов T_{ϕ} . Обширные исследования ВСЕГИНГЕО и других организаций по Сырдарьинскому, Ферганскому, Западно-Сибирскому и другим артезианским бассейнам подтвердили высокую эффективность предложенного приема (И. М. Мелькановицкий, 1968 г.; Т. А. Павлова, 1977 г.; М. Н. Байсарович, 1979 г.; А. Т. Бобринев, 1978 г. и др.). Так, например, по Сырдарьинскому бассейну удалось дать не только сравнительную, но и приближенную оценку водопроводимости Km комплексов с грунтовыми водами, приуроченными к аллювиальным и золовым отложениям N_2-Q , и комплексов с артезианскими водами в отложениях K_2 [15]. В дальнейшем геофизические построения были использованы при моделировании фильтрационного потока бассейна [24]. Данные по контрольным скважинам показали высокую степень точности геофизической информации.

Есть основание полагать, что корреляционная связь $T_{\phi}(Km)$ является более четкой, чем связь $\rho(K_{\phi})$. Действительно, оценка водопроводимости по данным откачек выполняется с точностью, существенно большей, чем определение K_{ϕ} , поскольку для установления коэффициента фильтрации необходимо определять эффективную мощность водоносного горизонта m . Последнее же зачастую связано с большими ошибками. С другой стороны, при изучении электроразведкой преимущественно песчаных,

гравийно-галечниковых отложений на кривых ВЭЗ фиксируется разрез типа К, КQ и др. Как известно, определять величину $T_3 = \rho h$ по таким кривым, в силу принципа эквивалентности, можно несравненно более точно, чем ρ или h . Если максимальные погрешности при оценке параметров T_3 и Km не превосходят первых десятков процентов, то при определении ρ и K_ϕ они могут быть на порядок выше.

Сопоставим данные по различным районам корреляционной связи $T_3(Km)$. На рис. 11 в билогарифмическом масштабе показаны графики этой зависимости. Их можно представить в виде серии параллельных прямых. В общем виде семейство графиков описывается функцией вида

$$T_3 = aKm^\alpha. \quad (1)$$

Величина a меняется в зависимости от геологических условий от 150 до 1200. Показатель степени α достаточно стабилен, и для всех объектов составляет 0,42—0,43. Как показывает накопленный опыт, на всех стадиях исследований при изучении аллювиальных, делювиальных, эоловых и флювиогляциальных образований, насыщенных грунтовыми либо напорными водами, получены положительные результаты при оценке водопроводимости терригенных пород по параметру T_3 , который определяется по данным ВЭЗ.

Рассматриваемый способ имеет некоторые ограничения. В первую очередь необходимо обратить внимание на влияние разного рода мешающих факторов. К числу их следует отнести: а) фильтрационную и геоэлектрическую неоднородность разреза, изменение этой неоднородности по площади и в разрезе; б) различную степень литификации водоносных пород, наличие в их составе прослоев плотных пород, отличающихся

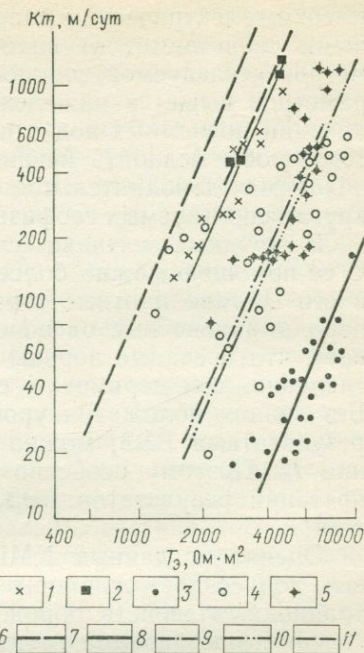


Рис. 11. Зависимость $T_3 = f(Km)$ по различным регионам (составили И. М. Мелькановицкий, В. И. Бобринов, Т. А. Павлова).

Точки сопоставления величин Km и T_3 : 1 — Северо-Чаунская оросительная система (Куйбышевская область), 2 — Рязано-Васильевская оросительная система (Ульяновская область), 3 — участок «Столбцы» (БССР), 4 — участок «Свислочь» (БССР), 5 — участок «Птичь» (БССР); графики зависимости $T_3(Km)$: 6 — Северо-Чаунская система; 7 — Рязано-Васильевская система; 8 — участок «Столбцы»; 9 — участок «Свислочь»; 10 — участок «Птичь»; 11 — Сырдарьинский артезианский бассейн (идеализированный график).

высоким электрическим сопротивлением и плохими фильтрационными свойствами; в) слабое отличие геоэлектрических параметров исследуемой водоносной толщи от геоэлектрических параметров выше- и нижележащих пород; г) изменение минерализации подземных вод в пределах изучаемой территории. Для того чтобы ослабить искажающее влияние этих факторов, необходима дополнительная информация за счет расширения круга используемых геофизических методов.

В трудных случаях следует привлекать сейсморазведку. С ее помощью можно более дробно расчлнить разрез, выявить в его составе плотные горизонты¹ и, наконец, четко отделить породы водоносные от пород зоны аэрации. Практика показывает, что песчаные породы зоны аэрации иногда имеют сопротивление, соизмеримое с сопротивлением водоносных пород. Без знания положения уровня грунтовых вод, пользуясь лишь результатами ВЭЗ, можно получить резко завышенные значения T_0 . Поэтому особенно ценной является совместная интерпретация результатов ВЭЗ, сейсморазведки и каротажа скважин.

Оценка по данным КМПВ глубины до поверхности грунтовых вод создает дополнительную возможность изучения фильтрационных свойств пород. Выявив по геофизическим данным гипсометрию зеркала грунтовых вод и оценив по редкой сети гидрогеологических скважин распределение расхода подземного потока, можно решить обратную задачу гидродинамики по определению значения Km . Какова достоверность такого решения, оценить трудно.

В ряде случаев целесообразно привлекать метод вызванной поляризации в модификации ВЭЗ-ВП. Это особенно важно при повышенной и одновременно меняющейся по площади минерализации подземных вод, когда электрическое сопротивление пород зачастую в большей мере реагирует на изменение минерализации подземных вод, в то время как поляризация η — на изменение фильтрационных свойств пород [42].

Оценка фильтрационных свойств (слабопроницаемых) пород. Водоупорные свойства однородных глин (преимущественно морского происхождения) достаточно хорошо могут быть изучены методом ВЭЗ по анализу их мощности h , величины сопротивления ρ и продольной проводимости S . Для этих пород фильтрационные свойства, как правило, улучшаются с обогащением их песком и соответственно увеличением электрического сопротивления ρ . В настоящее время накоплен достаточно большой опыт сравнительного (качественного) изучения таким способом глинистых водоупоров по многим районам страны. На

¹ Последние могут непосредственно фиксироваться сейсморазведкой, либо будут отмечаться заметным увеличением средней скорости v , характеризующей всю толщу разреза.

примере Сырдарьинского и Тургайского артезианских бассейнов показана возможность даже количественной оценки фильтрационных свойств таких пород путем решения балансовых уравнений подземного потока [15].

Более сложная картина наблюдается на площадях Московской синеклизы и аналогичных районов [17]. Здесь имеется два типа глинистых пород, водоупорные свойства которых по-разному отражаются геоэлектрическими характеристиками. К одному типу принадлежат юрские глины — однородные образования морского происхождения. Их электрическое сопротивление достаточно стабильно и определяется в основном соотношением песчаных и глинистых фракций. Определив мощность h и сопротивление ρ этих пород (либо их продольную проводимость S), можно дать качественную характеристику водоупора. Иначе характеризуются моренные суглинки, которые перекрывают и подстилают песчано-гравийные водно-ледниковые отложения. Зачастую обогащение валунным материалом резко увеличивает сопротивление моренных суглинков, мало отражаясь на их водоупорных свойствах. Вследствие этого небольшие гидрогеологические «окна» в моренных суглинках, намеченные при детальных исследованиях методом ВЭЗ, иногда не подтверждаются результатами бурения (Е. Г. Честный, 1973 г.).

Для более надежной оценки водоупорных свойств зачастую необходимо привлекать другие геофизические методы, в частности, ВЭЗ-ВП. Так, например, в 1963 г. под руководством А. А. Огильви [31] проводились гидрогеологические исследования в Мордовии в районе Саранского водозабора. В числе задач стояло исследование залегающих в верхней части разреза плотных песчаных глин J мощностью 60—70 м, являющихся верхним водоупором для нижележащих карбонатных пород. По величине сопротивления ρ этот слой плохо дифференцировался (10—17 Ом·м), но по ВЭЗ-ВП ($AB=0,6$ км, шаг наблюдений — 0,3—0,5 км) установлено, что слабообводненные глины имеют η_k не более 2%, а с увеличением степени увлажненности η_k возрастает до 2,5—3,0%. Поверхность сильно увлажненных глин находится на глубине 10—12 м, что обусловлено, по-видимому, их увлажнением под действием напорных вод нижележащего водоносного горизонта. Таким образом, при сравнительно малой глубине залегания глин методом ВП удастся дать сравнительную оценку их водоупорных свойств и выявить гидрогеологические «окна».

3.2. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ РЕЧНЫХ ДОЛИН

Водовмещающими породами этого типа месторождений служат средне- и грубозернистые пески, гравийно-галечниковые и валунные образования. Месторождения аллювиальных отложений речных долин в зависимости от ширины долин

(узкие — до 1—2 км, широкие — до 20 км и более), наличия в них древних переуглубленных русел, состава и водообильности пород коренного ложа и некоторых других признаков, оказывающих влияние на методику геофизических исследований, можно подразделить на подтипы и разновидности [26, 28]. Важнейшими из подтипов являются: 1) месторождения современных речных долин и 2) месторождения древних погребенных долин. Среди первых выделяются месторождения горных, предгорных и равнинных областей, ко вторым относятся главным образом древние долины в равнинных условиях. Каждый из перечисленных подтипов месторождений можно, в свою очередь, подразделить на две разновидности в зависимости от того, в каких породах заложена долина: в терригенных слабопроницаемых либо в скальных, отличающихся местами повышенной трещиноватостью.

Цель общих поисков месторождений указанного типа заключается в выделении площадей, где в принципе можно обнаружить перспективные для водоснабжения участки. Особенно эффективно такие исследования осуществляются при среднемасштабных гидрогеологических съемках, когда последние сопровождаются геофизическими и ландшафтными наблюдениями. При изучении современных речных долин в равнинных условиях целесообразно обследовать их на большом протяжении (в несколько сотен километров), выделив участки развития грубообломочных отложений; такие работы, например, проведены вдоль долины р. Дон, от Цимлянского водохранилища до ее устья. В засушливых областях может быть поставлена задача оконтуривания полосы, тянущейся к реке, насыщенной пресными грунтовыми водами. Подобные работы проведены в нижнем течении рек Урал, Сырдарья и др.

Если на территории не проведена среднемасштабная гидрогеологическая съемка, то общие поиски осуществляются с помощью метода ВЭЗ. Чаще наблюдения ведут по системе равностоящих поперечников. В зависимости от результатов общих поисков, расположения водопотребителей и т. п. можно резко ограничить площади дальнейших детальных поисковых работ, либо вообще сразу перейти к предварительной разведке.

Задачи геофизических исследований на стадии детальных поисков определяются главной целью — оконтурить перспективные для водоснабжения участки, когда имеющихся гидрогеологических сведений недостаточно и требуется в большом объеме проводить дорогостоящее бурение. При изучении речных долин решаются следующие задачи: оконтуривание в плане и определение мощности и глубины залегания грубообломочных водообильных отложений; оценка глубины и рельефа коренного ложа реки; прослеживание контуров древних погребенных долин; оконтуривание площадей с пресными и минерализованными грунтовыми водами. На практике в большинстве случаев

ограничиваются решением лишь первой задачи. На стадии поисков не ставится задача изучения фильтрационных свойств пород, однако, если условия благоприятные, такую оценку (хотя бы сравнительную) сделать желательно. Основной и в подавляющем числе случаев единственный метод — ВЭЗ с $AB_{\max} = 0,5 \div 2$ км. При необходимости более глубоинной разведки часть зондирований может быть выполнена с AB_{\max} до 4—5 км, иногда и более.

На стадии предварительной разведки перечисленные выше задачи решаются более детально и точно, что достигается за счет сгущения сети наблюдений и привлечения дополнительных геофизических методов. Помимо этих задач, решаются и другие: определяется литологический состав отложений, перекрывающих основной водоносный горизонт (исследования ведутся в пойме, иногда и в живом русле реки); уточняются мощность и состав водоупорных пород, подстилающих водоносные отложения; оценивается скорость и направление подземного потока; определяется уровень грунтовых вод (в пределах высоких террас); дифференцируется по литологическому составу разрез основного водоносного горизонта при значительной мощности его; оценивается водопроницаемость (или коэффициент фильтрации) водоносного горизонта; локализуются участки, где основные воды коренных пород ложа переливаются в аллювиальные отложения; уточняется строение и состав коренных пород, особенно когда распространенные в них подземные воды могут служить дополнительным источником водоснабжения. При предварительной разведке помимо ВЭЗ могут быть привлечены ЭП, ЕП, ВЭЗ-ВП, МЗТ, резистивиметрия, сейсморазведка и др.

На стадии детальной и эксплуатационной разведки полевые геофизические методы используются чрезвычайно редко¹.

Глубина геофизических исследований определяется мощностью аллювиальных отложений и обычно не превышает 50—100 м. При наличии трещиноватых пород, слагающих верхнюю часть скального основания, глубина разведки соответственно увеличивается. Необходимость изучения глубоких напорных водоносных горизонтов, которые могут быть гидравлически связаны с грунтовыми водами аллювия также требует увеличения глубины исследования. Максимальной (до 500—1000 м) становится глубина разведки при изучении речных долин предгорной части. Опорным геофизическим горизонтом служит, как правило, поверхность коренных пород.

Площадь геофизических исследований определяется стадией работ, геологическим строением района, гидрогеологическими особенностями и др. Как показывает практика, при последова-

¹ Аналогичное положение имеет место при изучении всех других типов месторождений рассматриваемой группы.

тельном переходе от одной стадии к другой (от менее к более детальной), площадь исследований сокращается примерно на порядок. В таких же пределах изменяется площадь при изучении (на одной и той же стадии) долин рек, широких и узких. Установлено, что поисковые работы, связанные с выявлением погребенных долин, могут проводиться только на больших территориях.

В площадь геофизических исследований следует включать не только долину реки, но и прилегающие к ней водораздельные пространства, обрабатывая их отдельными разрозненными профилями. Это необходимо для гидрогеологического изучения на водосборных площадях условий инфильтрации поверхностных вод, выяснения гидравлической связи грунтовых и артезианских вод, обследования трещиноватости коренных пород. В площадь исследований также желательно включать живое русло реки для изучения донных отложений.

Основная система наблюдений — площадная съемка методом ВЭЗ по серии поперечных к долине профилей, примерно равноотстоящих друг от друга. На стадии поисков, кроме того, иногда вдоль одного или по обоим берегам обрабатываются продольные профили, позволяющие при редком расположении поперечников составить представление о строении между ними.

В табл. 3 приводятся средние данные об основных показателях съемки по методу ВЭЗ. Сведения о предварительных и детальных поисках даются совместно; отличие сети наблюдений

Таблица 3

Показатель съемки	Стадия исследований	Средние данные	
		узкие долины	широкие долины
Площадь исследований, км ²	Поиски Предварительная разведка	(10—100) <i>n</i> ¹ 1—10	(100—1000) <i>n</i> (10—100) <i>n</i>
Расстояние между профилями, км	Поиски Предварительная разведка	1—2 0,5—1	2—8 1—2
Расстояние между точками ВЭЗ вдоль профиля (шаг), м	Поиски Предварительная разведка	250—500 50—250	500—1000 250—500
Густота сети наблюдений по методу ВЭЗ, ф. т./км ²	Поиски Предварительная разведка	1—4 4—40	0,1—1 1—4
Результативный масштаб	Поиски Предварительная разведка	1 : 50 000—1 : 25 000 1 : 25 000—1 : 10 000	1 : 200 000—1 : 100 000 1 : 50 000—1 : 25 000

¹ Здесь и в остальных таблицах $n = 1 \div 10$.

первых от вторых не всегда четко устанавливается, однако в целом из приведенных данных наиболее мелкий масштаб и максимальное расстояние между поперечниками относятся к предварительным поискам¹. Применение остальных методов геофизической разведки рассмотрено в табл. 4.

Перейдем к описанию особенностей геофизических исследований выделенных выше различных типов речных долин.

Речные долины горных районов. Это долины сравнительно узкие, заполнены преимущественно грубообломочным аллювием, мощность которого может меняться в широких пределах, иногда достигая 50—100 м и более. Зачастую долины представляют собой сочетание древних и современных речных русел, отделить которые друг от друга геофизическими методами трудно. В большинстве случаев метод ВЭЗ обеспечивает решение основных поисково-разведочных задач. Исследования долин указанного типа проводились по Черноморскому побережью Кавказа (И. Н. Соколов, 1965, 1966 гг.), Крыму, Уралу (А. А. Огильви, 1944 г.; З. Г. Ященко, 1969 г.), Тянь-Шаню и др.

Предгорные речные долины. Долины отличаются огромной мощностью аллювиально-делювиальных отложений, достигающей 500—1000 м и более. Современные и древние долины в таком типе гидрогеологических структур обычно сливаются вместе. Долины имеют ограниченную длину — не более первых десятков километров после выхода реки из горной местности. Месторождения этого типа широко известны в Средней Азии, на Кавказе и в других предгорных районах. Для рассматриваемого типа долин характерна сложная тектоника. Часто долины приурочены к грабенам, что особенно способствовало накоплению мощных отложений. Обычно всю толщу грубообломочных отложений можно разделить на несколько горизонтов, один из которых отличается наиболее грубообломочным составом. Например, геоэлектрические исследования долины р. Чирчик вблизи Ташкента (И. М. Мелькановицкий, 1961 г.) показали, что мощность аллювиально-делювиальных образований достигает здесь 500—700 м. Верхняя половина разреза сложена валунно-галечниковым и песчано-галечными отложениями Q_{2-4} , электрическое сопротивление которых варьирует от 300 до 1000 Ом·м. Это наиболее водообильная часть разреза. Ниже залегают суглинки, алевролиты, пески, гравелиты ($N_2—Q_3$). Их сопротивление меняется от 40 до 150 Ом·м. Водообильность неоген-четвертичной толщи резко снижена. Вся толща аллювиально-делювиальных отложений врезана в более древние мезозойско-кайнозойские глинистые образования, среднее сопротивление которых равно 25—30 Ом·м.

¹ Табл. 3 составлена на основании анализа полевых работ примерно по 90 объектам. При статистической обработке материала привлечены лишь данные, обеспечивающие рациональное решение поисково-разведочных задач. Аналогичным способом составлены таблицы по другим типам месторождений.

Таблица 4

Геофизический метод (или модификация)	Стадия исследований	Сеть наблюдений и особенности применения метода
Электропрофилирование (ЭП)	Изредка детальные поиски, чаще — предварительная разведка	Площадная съемка; расстояние между профилями ЭП такое же, как и для ВЭЗ, или вдвое гуще. Шаг наблюдений — 25—50 м
Метод естественных электрических полей (ЕП)	Предварительная разведка	Изучаются отдельные участки в долине реки, ее живом русле, иногда на водоразделах. Шаг наблюдений — от 5—10 до 25—50 м, расстояние между профилями в 5—10 раз больше шага
Метод заряженного тела (МЗТ) Резистивометрия (в комплексе с термометрией)	Предварительная разведка Поиски и предварительная разведка	Выполняется на большинстве имеющихся скважин Производятся, когда ожидается подток соленых подземных вод. Наблюдения в русле реки увязываются с системой поперечных профилей ВЭЗ. Шаг наблюдений — от 5—10 до 25—50 м
Метод ВЭЗ-ВП	Предварительная разведка	Наблюдения ставятся на части точек основной сети ВЭЗ, разности AB_{\max} — до 0,5—1 км
Сейморазведка	Преимущественно предварительная разведка	Применяется в трех вариантах: а) отдельные зондирования МПВ для определения положения УГВ; длина годографа 50—200 м, расстояние между сейсмоприемниками (СП) от 1—2 до 5—10 м по мере удаления от центра возбуждения колебаний или пункта взрыва (ПВ); б) профили КМПВ для изучения строения разреза до глубины 100—200 м; в пределах исследуемого участка в наиболее интересных местах прокладываются один—два поперечных и один продольный профиль; расстояние между СП от 5—10 до 25 м; в) профили МОВ для изучения древних погребенных долин, перекрытых мощным покровом молодых образований.
Гравиразведка	Детальные поиски	Используется для выявления древних глубоко врезанных в коренные породы погребенных долин. Система поперечных профилей по сети (1—2) × (0,1—0,2) км; погрешность не более $\pm 0,1 \cdot 10^{-5}$ м/с ²
Микромагнитная съемка	Детальные поиски и предварительная разведка	Применяется для выявления наиболее грубообломочных отложений; сеть наблюдений — густая

Электроразведка ВЭЗ является основным методом исследований месторождений подземных вод предгорных долин. На этапе предварительных поисков, наряду с отработкой ВЭЗ на отдельных профилях, целесообразно привлечение готовых материалов региональных геофизических исследований в целях изучения тектоники района (И. М. Мелькановицкий, 1958 г.).

Современные речные долины равнинных областей. Опыт геофизических исследований современных речных долин в равнинных условиях имеется по Русской равнине, Западной Сибири, Средней Азии, Казахстану, Прикаспию. Для этих долин характерны тонкообломочный состав аллювия, его малая мощность. Долины, как правило, широкие. В большинстве случаев аллювиальные отложения залегают на песчано-глинистых более древних образованиях, реже — на скальных породах (обычно карбонатных отложениях). Основной задачей геофизических исследований является выявление участков с увеличенной мощностью песчано-гравийно-галечниковых отложений. В ряде случаев необходимо определить литологический состав пород, перекрывающих водоносные гравийно-галечниковые отложения. Задачу можно легко решить электропрофилированием в комплексе с ВЭЗ с малыми разносами AB_{\max} .

Большое значение приобретают исследования, связанные с выяснением гидравлической связи грунтовых вод с поверхностными водами рек. С этой целью необходимо исследовать фильтрационные свойства приповерхностных отложений живого русла реки и ее береговых участков. Донные электропрофилирование и зондирование, метод ЕП и сейсмоакустическое профилирование позволяют оценить состав, мощность и проницаемость донных отложений.

При изучении скорости и направления грунтового потока в аллювиальных отложениях можно использовать методы заряженного тела (МЗТ), естественной поляризации (ЕП) и сейморазведки МПВ. Эти методы позволяют при благоприятных условиях (однородность приповерхностной части разреза, пологий рельеф, неглубокое залегание грунтовых вод, движущихся с большой скоростью) установить, в какую сторону движется поток (от реки или в сторону реки).

Иногда грунтовые воды аллювиальных отложений периферических частей широких долин приобретают повышенную минерализацию. Оценка минерализации можно дать с помощью ВЭЗ или ЭП по обычной методике. Кроме того, с помощью резистивиметрии можно выявить участки реки, где идет переток глубоких соленых вод в пресные грунтовые и поверхностные воды.

При эксплуатации месторождений грунтовых вод аллювиальных отложений иногда привлекаются воды коренных отложений, часто напорные. По происхождению своему это пластово-поровые, пластово-трещинные, трещинные, трещинно-жильные или

трещинно-карстовые воды. Исследование их рассмотрено в разделе 4.

Древние погребенные долины равнинных областей, врезанные в массивные коренные породы. Такие долины имеют большое распространение на площади Русской платформы, Балтийского Щита, Центрального Казахстана и др. Зачастую в условиях равнин, когда артезианские воды могут быть солеными, а современный аллювий отличается тонкообломочным характером, только подземные воды древних долин, заполненных грубообломочными аллювиальными и водно-ледниковыми отложениями, могут быть использованы для крупного водоснабжения. В закрытых районах трудно выявить древние долины геологическими методами. Не всегда эффективны и ландшафтные методы. В такой обстановке роль геофизических методов, особенно на этапе поисковых работ, трудно переоценить.

Выявление древних погребенных долин в условиях равнин требует обследования обширных площадей. Здесь особенно целесообразно введение этапа предварительных поисков, осуществляемых при среднемасштабной гидрогеологической съемке. Для обнаружения погребенных долин используются электроразведка ВЭЗ (иногда в комплексе с ЭП), высокоточная гравиметрия и сейсморазведка.

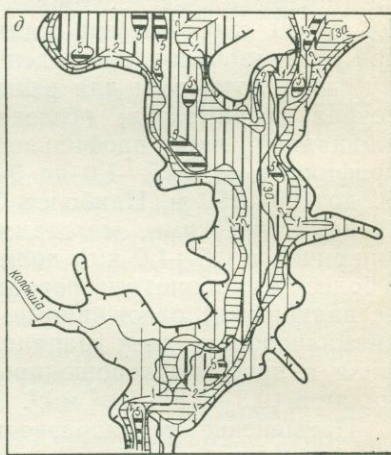
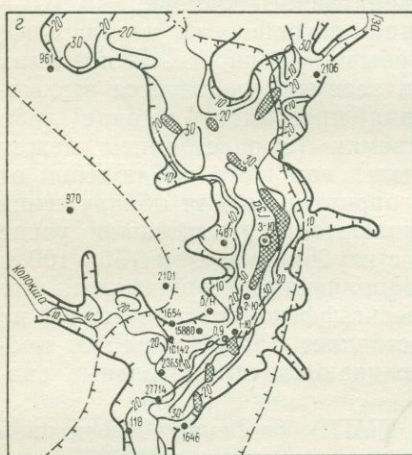
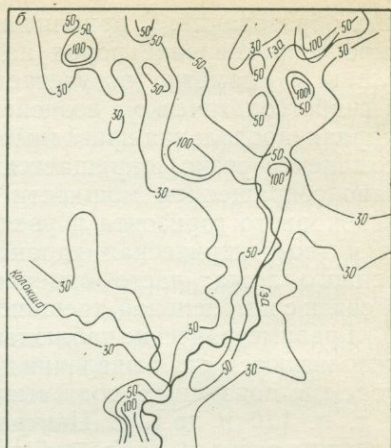
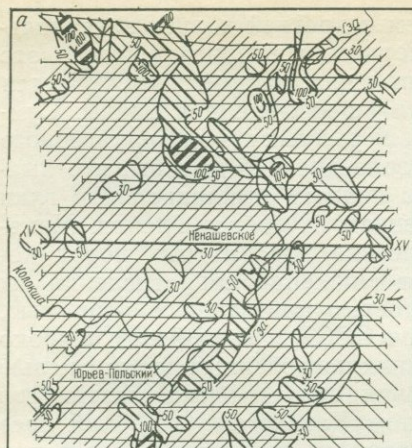
Наибольший опыт использования метода ВЭЗ — по Московскому артезианскому бассейну. Здесь особенно благоприятен для исследования первый вариант, когда коренное ложе и борта долины сложены карбонатными или галогенными породами, имеющими электрическое сопротивление, намного превышающее сопротивление пород, заполняющих эту долину. Прослеживание древних долин производится одновременно с изучением рельефа поверхности карбонатно-галогенных пород.

Менее благоприятным является случай, когда древняя долина выполнена грубообломочными породами, залегающими непосредственно на карбонатно-галогенных образованиях — можно лишь проследить древнюю долину, но не удастся решить вопрос о глубине вреза, так как сопротивление аллювиальных образований и коренных пород мало различаются. Если грубообломочные породы имеют мощность, соизмеримую с относительной глубиной вреза, а сверху перекрыты суглинками и другими глинистыми породами, древнее русло выявить методом ВЭЗ еще более трудно. Тем не менее в настоящее время обнаружен ряд признаков, облегчающих выделение таких долин (Н. Г. Кежутин, 1963 г.; К. Н. Куделин, 1972 г.; В. Н. Наумкина, 1971 г. и др.). Сопротивление неоген-четвертичных отложений в зоне древней долины повышено; вызвано это, с одной стороны, огрублением осадков, с другой — большей проницаемостью отложений в зоне долины. Геоэлектрический разрез зоны древней долины усложняется, что связано с частой сменой условий осадконакопления аллювиальных и флювиогляциаль-

ных образований. С приближением к древней долине электрическое сопротивление пород надопорного горизонта (обычно это глины J) заметно возрастает; причина, видимо, заключается в гидрогеологическом воздействии на них мощной дрены. Суммарная продольная проводимость S рыхлых пород терригенного комплекса резко сокращается в зоне древней долины; это вызвано сокращением мощности (до полного выклинивания) глины надопорного горизонта и увеличением их сопротивления. Меняется геоэлектрическая характеристика карбонатных пород коренного ложа: часто отмечается снижение сопротивления их в связи с интенсивной трещиноватостью или закарстованностью.

Гравиметрические наблюдения в СССР и за рубежом широко используются для выявления древних погребенных долин с целью поисков подземных вод, выявления строительных материалов и т. п. [20 и др.]. В Центральном Казахстане глубокий врез древних русел в домезозойские породы, значительный перепад плотностей на исследуемой гравиактивной границе (до $0,5—0,6$ г/см³) способствуют выявлению погребенных долин даже при использовании наблюдений обычной точности. В пределах Русской платформы для решения задачи используется высокоточная гравиметрия; исследования проводятся в виде либо площадной, либо профильной съемки (с расстоянием между профилями от $0,25—1,0$ до $3—4$ км) при шаге наблюдений от 50 до $100—150$ м. Наиболее благоприятными для обнаружения гравиметрическими методами являются сравнительно узкие (шириной в $0,5—1,0$ км) долины с глубоким врезом ($50—100$ м и более) в карбонатные породы, заполненные терригенными (но не валунными) отложениями. Здесь эффективная плотность на аномалиеобразующей границе составляет $0,2—0,4$ г/см³; от профиля к профилю хорошо прослеживаются отрицательные аномалии в $(0,3—0,8) \cdot 10^{-5}$ м/с².

Применение сейсморазведки КМПВ особенно эффективно при изучении погребенных долин в плотных породах. Резкое отличие скоростных характеристик рыхлых и скальных пород способствует решению задачи. Однако высокая стоимость сейсморазведки приводит к тому, что ее используют редко и, как правило, лишь на стадии предварительной разведки в сложных геоэлектрических условиях. Например, заполнение древних долин песчано-гравийным материалом, геоэлектрически не отличающимся от карбонатных пород, не является помехой для КМПВ. И если по электроразведке не всегда можно установить, с чем связаны «провалы» опорного электрического горизонта, с эрозийным рельефом или с наличием сильнотрещиноватых пород (иногда заглинизированных или насыщенных высокоминерализованными водами), по сейсморазведке этот вопрос решается легко, так как поверхность карбонатных пород надежно фиксируется, а снижение граничной скорости v_r свидетельствует о наличии трещиноватых пород. Широкие древние погребенные



долины с глубоким врезом в коренные породы могут быть выявлены МОВ. Например, при пересечении погребенных долин Волго-Камского бассейна, заполненных мощными неоген-четвертичными отложениями, на профилях МОВ фиксируются зоны, в которых нарушается корреляция отраженных волн.

Древние погребенные долины равнинных областей, врезанные в песчано-глинистые породы. Такие долины широко распространены и геофизически изучены на площади Русской платформы, где карбонатно-галогеогенный комплекс погружен на значительную глубину. Имеются они и в Западной Сибири, Средней Азии и других местах.

Среди древних долин, врезанных в песчано-глинистые породы, можно выделить с точки зрения методики их геофизических исследований две разновидности: 1) мощные грубообло-

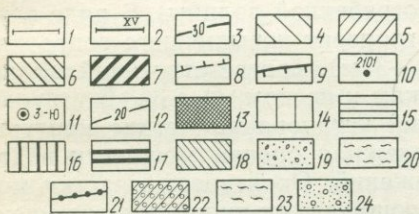
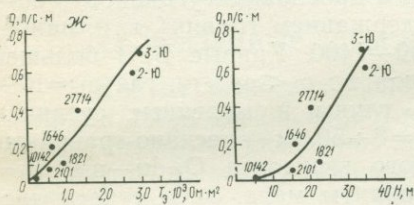
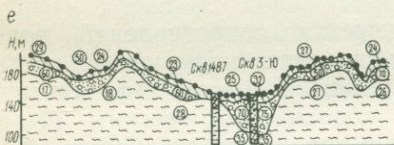
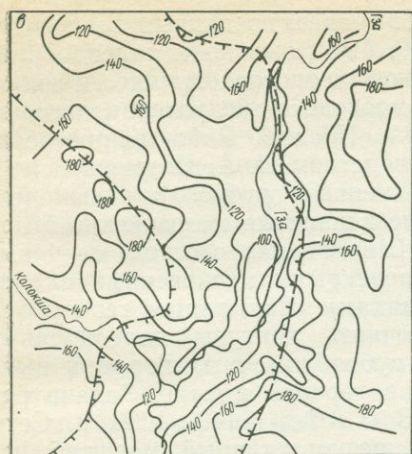


Рис. 12. Результаты поисково-разведочных геофизических работ на участке Юрьев-Польский Владимирской области (по данным И. А. Науменко, 1972 г.).

а — карта кажущихся сопротивлений ρ_k при $AB/2 = 25$ м; б — карта кажущихся сопротивлений ρ_k при $AB/2 = 100$ м; в — гипсометрическая карта поверхности опорного электрического горизонта; г — мощность гравийно-галечниковых отложений; д — карта поперечного электрического сопротивления T_a гравийно-галечниковых отложений (составлена И. М. Мелькановицким); е — геозлектрический разрез по профилю XV; ж — графики корреляционной зависимости удельного дебита скважин от величины T_a и мощности гравийно-галечниковых отложений.
 1 — профили электроразведки; 2 — линии геозлектрического разреза по профилю XV; 3 — изоомы ρ_k , Ом·м: зоны кажущихся сопротивлений ρ_k , Ом·м: 4 — менее 30, 5 — от 30 до 50, 6 — от 50 до 100, 7 — более 100; 8 — контуры погребенной дочетвертичной долины по данным геолого-гидрогеологической съемки масштаба 1:200 000 1964—1965 гг.; 9 — контур древней погребенной долины по данным съемки ВЭЗ 1972 г.; гидрогеологические скважины, их номер: 10 — ранее пробуренные, 11 — контрольные; 12 — линии равных мощностей гравийно-галечниковых отложений, м; 13 — участки морены, перекрывающей гравийно-галечниковые отложения и характеризующейся повышенным содержанием обломочного материала; зоны различного значения T_a , тыс. Ом·м²: 14 — менее 1; 15 — от 1 до 2; 16 — от 2 до 5; 17 — более 5; преимущественный литологический состав пород на разрезе: 18 — моренные суглинки; 19 — гравийно-галечниковые отложения; 20 — глины; 21 — точки ВЭЗ на разрезе; преимущественный литологический состав пород по данным бурения: 22 — морена; 23 — глины; 24 — песок, гравий, галечник

мочные отложения, представленные аллювиальными или флювиогляциальными образованиями, заполняют древнюю долину; грубообломочные отложения выходят на поверхность либо перекрыты маломощными глинистыми образованиями; 2) грубообломочные отложения, заполняющие древнюю долину, перекрыты мощной толщей глинистых образований.

Изучение долин первой разновидности наиболее просто и, как правило, выполняется с большим эффектом методом ВЭЗ. В качестве примера рассмотрим результаты поисково-разведочных работ с целью водоснабжения г. Юрьев-Польского (Влади-

мирская область) (рис. 12). Здесь ранее, по данным геологической съемки масштаба 1 : 200 000, была выявлена палеодолина, в пределах которой распространены водосодержащие песчано-гравийные флювиогляциальные московско-днепровские отложения. Площадь исследований около 150 км². Работы проведены в 1972 г. ГУЦР РСФСР по руководством И. А. Науменко.

Узкая древняя долина, заполненная грубообломочным материалом, врезана в водоупорные глинистые мезозойские отложения, глубина вреза до 50 м. Ширина палеодолины 2—4 км. Сверху водоносные отложения перекрыты московскими слабопроницаемыми моренными суглинками. По данным геофизической разведки требовалось уточнить контуры палеодолины, оценить мощность водоносных грубообломочных пород и выявить гидрогеологические «окна» в верхней морене. Задачи решались с помощью метода ВЭЗ с $AB_{\max} = 440 \div 1000$ м. Сеть наблюдений $500 \times (250-500)$ м, результативный масштаб исследований 1 : 25 000.

Значения удельных электрических сопротивлений пород участка колеблются в следующих пределах (в Ом·м): а) чистые глины и суглинки — 10—30; б) глины с обломочным материалом, заглинизированные или обводненные пески — 30—50; в) песчано-гравийные отложения с прослоями суглинков — 50—150; г) пески с повышенным содержанием гравия (т. е. наиболее водообильные породы) — 150—1400. Кривые ВЭЗ большей частью характеризуют разрез вида К: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$, где $\rho_1 = 10 \div 40$ Ом·м, $h_1 = 3 \div 15$ м — это глины и моренные суглинки Q_{IIms} ; $\rho_2 = 50 \div 1400$ Ом·м, $h_2 = 8 \div 50$ м — песчано-гравийные отложения днепровско-московского горизонта $Q_{IIpн-ms}$; $\rho_3 = 10 \div 40$ Ом·м — глины и алевролиты мела, либо супеси днепровской морены (в пределах погребенной долины). В ряде случаев с поверхности выделяется горизонт повышенного сопротивления ($\rho = 40 \div 190$ Ом·м, $h = 1-3$ м), соответствующий аллювиальным опесоченным суглинкам и пескам Q_{III-IV} . В результате геофизических исследований установлены четкие контуры древней долины и получена надежная оценка мощности водоносных песчано-гравийных отложений. Оконтурированы участки моренных отложений, характеризующихся, по-видимому, повышенным содержанием обломочного материала. Обнаружена прямая связь между удельным дебитом скважин q и поперечным сопротивлением T_z песчано-гравийных отложений $Q_{IIpн-ms}$.

Значительно сложнее изучение древних долин второй разновидности. Обычная количественная интерпретация ВЭЗ из-за слабых изменений геоэлектрических параметров не позволяет выделить древнюю долину. Однако выполнение ВЭЗ по густой сети наблюдений и интерпретация по методу конечных разностей могут резко улучшить результаты. Иногда даже обычное профилирование с детальным шагом дает положительные результаты. Например, при исследованиях на одном из участков

Ивановской области (Н. Г. Кежутин, 1965 г; Т. А. Малышева, 1965 г.) требовалось оконтурить гравийно-галечниковые отложения, залегающие под мощной (несколько десятков метров) толщей глинистых моренных образований (мощность гравийно-галечниковых отложений примерно такого же порядка, что и глубина их залегания). По ВЭЗ они выделялись нечетко. Однако использование ЭП с АВ=200 м по сети $(0,25-1) \times (0,025-0,050)$ км в комплексе с отдельными пунктами ВЭЗ позволило по слабому, но достаточно хорошо коррелируемому от профиля к профилю максимуму ρ_k проследить гравийно-галечниковую залежь. Контрольные скважины подтвердили результаты электроразведки.

Гравиметрические высокоточные наблюдения также могут оказать существенную помощь при выявлении погребенных долин рассматриваемой разновидности. При этом эффективная плотность заполнителя древних долин по отношению к плотности коренных пород может достигать в среднем $0,2 \text{ г/см}^3$ и иметь как положительный, так и отрицательный знак в зависимости от состава отложений. Следовательно, и наблюдаемые аномалии могут отличаться различным знаком (Д. С. Вагшаль, 1973 г.).

3.3. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КОНУСОВ ВЫНОСА

Конуса выноса прослеживаются по периферии крупных горных сооружений, испытывающих интенсивные неотектонические поднятия. Особенно хорошо они развиты в предгорьях Большого Кавказа, Копетдага, Тянь-Шаня, Памира. В грубообломочных отложениях конусов выноса концентрируются огромные запасы пресных подземных вод. Обычно мощность рыхлых грубообломочных отложений конусов выноса составляет 200—300 м, но иногда, в условиях интенсивного прогиба впадин, достигает 2000—3000 м. При слиянии конуса выноса образуют единый предгорный шлейф.

В разрезе конусов выноса прослеживается несколько характерных горизонтов. Сверху отложения могут быть представлены маломощным слабопроницаемым мелкоземом. Ниже обычно залегает мощная толща грубообломочных, хорошо промытых наиболее водообильных пород. Она подстилается также грубообломочными породами, обогащенными, однако, глинистым материалом. Аллювиально-делювиальные образования конусов выноса залегают обычно на мощных водоупорных толщах. Они могут быть представлены существенно глинистыми образованиями, либо плотными конгломератами, либо массивными породами складчатого основания (фундамента). Близки по строению к конусам выноса крупные осыпи. В условиях Южного Крыма они являются весьма важным аккумулятором пресных подземных вод.

Полевые геофизические методы уже давно и эффективно применяются при гидрогеологическом изучении конусов выноса, навалов, осыпей, предгорных шлейфов. Резкая дифференциация по физическим (и особенно геоэлектрическим) свойствам пород способствует удаче (В. В. Галаган, 1976 г.; И. Д. Зимкин, 1973 г.; А. С. Шахназарян, 1967 г. и др.). Общие поиски, позволяющие дать лишь приближенный прогноз о распространении перспективных на подземные воды площадей, осуществляются на базе специализированного анализа имеющихся геофизических материалов и данных геофизических наблюдений при среднемасштабной съемке.

На стадии поисков с помощью геофизических методов необходимо: 1) уточнить глубинное геологическое строение территории (окинуть отдельные нечетко проявляющиеся межгорные впадины, проследить зоны крупных разломов, выявить основные структуры, связанные с новейшей тектоникой); 2) оценить мощность грубообломочных отложений и установить глубину до регионального водоупора; 3) дать приближенное расчленение разреза рыхлых образований с выделением наиболее грубообломочных толщ (они являются наиболее водообильными); 4) осуществить приближенное районирование территории с выделением участков глубокого и неглубокого залегания грунтовых вод; 5) проследить границу, разделяющую зоны с пресными и минерализованными подземными водами; 6) приближенно оценить фильтрационные свойства основной водовмещающей толщи пород (С. Ш. Мирзаев, 1973 г.; В. Е. Квон, 1973 г.); 7) детально изучить литологический состав пород зоны аэрации; 8) установить направление и скорость грунтового потока; 9) определить положение уровня грунтовых вод; 10) оконтурить области питания и разгрузки подземных вод в зоне конуса выноса; 11) изучить влагоперенос в зоне аэрации; 12) определить минерализацию грунтовых вод; 13) установить контуры водоупорных отложений, перекрывающих сверху основной водоносный горизонт; 14) дать сравнительную характеристику фильтрационных свойств пород регионального водоупора; 15) расчленить разрез водоносных толщ на несколько горизонтов, отличающихся своими фильтрационными свойствами. На стадии общих поисков решаются задачи 1—3, на стадии детальных поисков — задачи 4—6 и более детально задачи 2, 3; на стадии предварительной разведки — остальные задачи.

Метод ВЭЗ является основным способом геофизических исследований конуса выноса. На различных стадиях он дополняется другими методами, имеющими вспомогательную роль. При предварительных поисках важное место занимает специализированная интерпретация имеющихся материалов. Привлекаются данные электро-, сейсмо-, грави- и магниторазведки. При детальных поисках помимо ВЭЗ иногда используется сейморазведка МПВ главным образом для определения положения зер-

кала грунтовых вод. Резко расширяется комплекс геофизических методов на стадии предварительной разведки. Вместе с ВЭЗ применяются ЭП, ЕП, ВЭЗ-ВП, МЗТ, сейморазведки МПВ и КМПВ. Однако, если метод ВЭЗ используется на всех стадиях для сплошных площадных исследований, то наблюдения остальными методами, как правило, проводятся на ограниченных участках, по разрозненным профилям или в отдельных пунктах.

В соответствии с задачами гидрогеологических исследований глубинность и площадь геофизической разведки меняются, причем отмечается уменьшение площади при переходе к разведке (табл. 5). При изучении небольших межгорных долин съемкой покрывается вся их площадь.

Система наблюдений меняется вместе со стадиями исследований. При предварительных поисках используются в основном отдельные разрозненные маршруты, ориентированные вкострест межгорной или предгорной впадины. При детальном поиске крупных конусов выноса профили можно располагать веерообразно с центром в устье конуса. Профили протягиваются, пересекая весь конус, вплоть до перехода грубообломочных пород в тонкообломочные и расщепления единой толщи на отдельные мелкие горизонты. При изучении предгорного шлейфа целесообразно вначале отработать вдоль всего участка продольный профиль, с помощью его выделить конусные и межконусные участки, а затем заложить систему поперечников, концентрируя их в зонах скопления наиболее грубообломочных по-

Таблица 5

Показатели геофизических работ методом ВЭЗ	Стадии исследований конусов выноса		
	Общие поиски	Детальные поиски	Предварительная разведка
Площадь исследований, км ²	(1000—10 000) <i>n</i>	От 500—1000 до 2000—5000	(10—100) <i>n</i>
Глубина исследований, м	До 500—1000 и более	200—500	100—200, местами 300—500
Разносы AB_{\max} , км	От 2—4 до 6—10	Преимущественно 1—3 (часто до 4—6)	Подавляющее большинство 1—2, незначительная часть 4—6
Расстояние между профилями, км	5—10 и более	2—5	1—2
Шаг наблюдений вдоль профиля, км	2	1 (реже 0,5 и 2)	0,5—1 (реже 0,25)
Густота сети наблюдений, ф. т./км ²	0,05—0,10	0,2—0,5	0,5—4
Результативный масштаб	1 : 500 000— 1 : 200 000	1 : 200 000 (реже 1 : 100 000)	1 : 50 000— 1 : 25 000

род. На стадии предварительной разведки в два—четыре раза сгущается сеть наблюдений, созданная при поисках. Помимо поперечных профилей, обрабатываемых методом ВЭЗ, исследуются отдельные участки, профили и пункты другими геофизическими методами.

Вопросы, связанные с проведением метода ВЭЗ, рассматриваются в табл. 5; опыт применения других методов небольшой, сведения о них (табл. 6) носят ориентировочный характер.

Таблица 6

Методы	Задачи исследований	Сеть наблюдений и особенности методики
Точечные зондирования (ТЗ) МПВ	Определение уровня грунтовых вод и литологическое расчленение разреза	Сеть $(1-2) \times (1-2)$ км; сейсморазведка комплексирована с ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ЕП и МЗТ; методы электроразведки способствуют сокращению объема ТЗ МПВ
КМПВ	Определение глубины до водоупорных пород	Система профилей, отстоящих друг от друга на 1—2 км, шаг наблюдений — в среднем 25 м, КМПВ применяется в тех случаях, когда ВЭЗ неэффективно
ЭП	Изучение верхнего слабопроницаемого горизонта, перекрывающего водоносную толщу	Изучаются отдельные участки; сеть $(250-1000) \times 50$ м; ЭП используется с малыми разносами (до 100 м)
	Картирование грубообломочных водоносных отложений в комплексе с методом ВЭЗ	Изучается часть или вся площадь съемки; сеть $(500-2000) \times (50-100)$ м, установка АА'МNB'B, АВ=500—1000 А'В' = 100÷200 м
ЕП	Выявление неглубокозалегающего интенсивного подземного потока, оконтуривание областей питания и разгрузки подземных вод	Изучаются отдельные участки, сеть $(50-250) \times (10-25)$ м и реже
ВЭЗ-ВП	Расчленение слабодифференцированного разреза, оценка глубины до УГВ	Изучаются отдельные участки, сеть $(1-2) \times (1-2)$ км, АВ _{max} — до 1—2 км
МЗТ	Определение направления и скорости грунтового потока	Полученные данные привлекаются также при построении карты гидроизогипс грунтовых вод
Микромагнитная съемка	Выделение наиболее грубообломочных отложений	Детальная сеть на отдельных участках; исследования опытно-производственного характера

Вопросы интерпретации геофизических данных в основном рассмотрены в разделе 3.1. Вместе с тем следует обратить внимание при изучении конусов выноса на следующие моменты:

а) обширный опыт показывает, что грубообломочные аллювиально-делювиальные отложения, слагающие основную часть конуса выноса, в большинстве случаев могут быть расчленены на две толщи: верхнюю — водоносную, отличающуюся сравнительно высоким электрическим сопротивлением, и нижнюю — слабоводообильную, характеризующуюся пониженным сопротивлением (но более высоким, чем, например, подстилающие глинистые образования регионального водоупора). Обычно это получает яркое проявление на кривых ВЭЗ. В тех случаях, когда такой переход не заметен, необходимо использовать данные электрокаротажа (КС или БКЗ) для того, чтобы установить соотношение электрических сопротивлений указанных толщ. Это поможет правильно проинтерпретировать кривые ВЭЗ и выделить наиболее водообильные отложения;

б) на межконусных пространствах мощность грубообломочных отложений резко сокращается. Зачастую сохраняется лишь сравнительно маломощный горизонт, насыщенный пресными напорными водами, который достаточно четко фиксируется кривыми ВЭЗ (Н. Н. Романов и др.; 1972 г.);

в) в зоне выклинивания конусов выноса быстро нарастает минерализация подземных вод при одновременном изменении литологического состава водовмещающих пород. Это осложняет определение минерализации подземных вод M по величине электрического сопротивления пород ρ_{Π} . Как показано В. Е. Квоном (1973 г.) по одному из конусов выноса Северной Ферганы, для пересчета ρ_{Π} в M необходимо пользоваться серией графиков $\rho_{\Pi}(M)$, составленных для различных литологических разностей. При такой ситуации целесообразно привлечь также данные метода ВЭЗ-ВП. Корреляционная связь типа $M(\rho_{\Pi}, \eta)$ позволяет более однозначно решить вопрос.

В качестве примера осуществления общих поисков по имеющимся материалам приведем соответствующие построения, выполненные по Приташкентскому и Ферганскому артезианским бассейнам. На рис. 13 показано распределение мощности грубообломочных аллювиально-делювиальных отложений N_2-Q . Карта в оригинале составлена в масштабе 1:500 000. Для ее построения использованы геофизические данные, полученные в различные годы при поисках и разведке нефтяных, угольных и других месторождений полезных ископаемых. Особенно эффективна карта параметра T_3 , составленная для Ферганской впадины. На ней четко выделяются крупные конуса выноса.

В качестве другого примера геофизических исследований при изучении конусов выноса укажем на работу ГУ при Совете

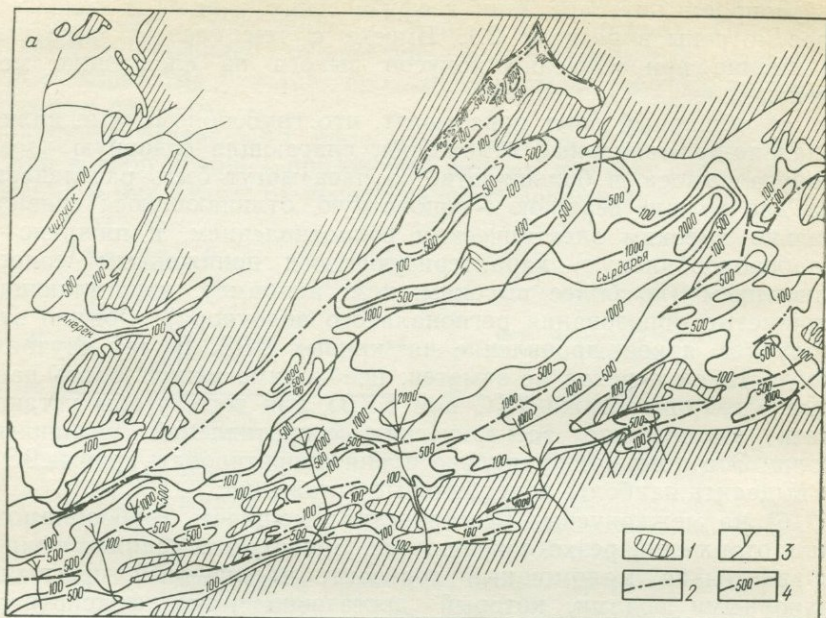


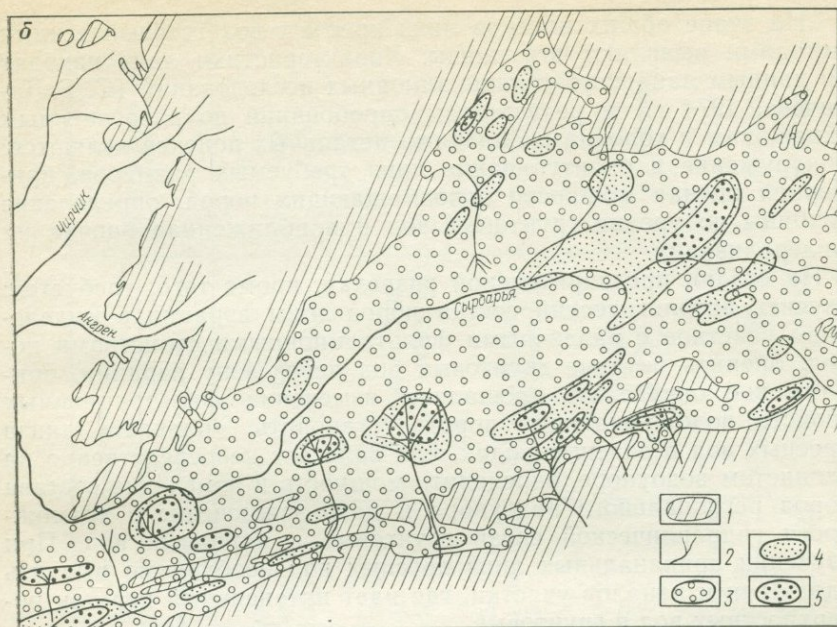
Рис. 13. Карта мощности и поперечного электрического сопротивления T_z гранично-стенового конуса выноса и предгорные шлейфы. Ферганская впадина и В. Я. Синельников).

a — карта равных мощностей гравийно-галечниковых отложений N_2-Q ; 1 — выходы на сеть; 4 — линии равных мощностей гравийно-галечниковых отложений, м; *b* — карта походы на поверхность пород складчатого основания; 2 — гидрографическая сеть; зоны 200 000

Министров ТаджССР, проведенные на стадии предварительной разведки в 1968—1970 гг. под руководством И. Д. Зимкина в северо-западной части Ферганской долины на Аштском участке.

3.4. ЛИНЗЫ ПРЕСНЫХ ВОД

В засушливых областях среди соленых вод широко распространены линзы пресных подземных вод. Они образуются преимущественно в терригенных породах с хорошими фильтрационными свойствами [25]. Хотя содержащиеся в линзах запасы подземных вод часто незначительные, роль их необычайно велика, поскольку они иногда являются единственным источником водоснабжения [26]. Наиболее крупные линзы пресных вод образуются в мощных эоловых песках пустынь Каракум, Кызылкум. Известны линзы в южной части Западно-Сибирской низменности и других местах. По происхождению линзы пресных вод можно подразделить на линзы инфильтрационного питания (подпесчаные, такырные, шорные) и линзы, образующиеся вдоль рек, стариц, оросительных каналов, питающиеся за



вино-галечниковых аллювиально-делювиальных отложений, слагающих пре-Приташкентский район. (Составили И. М. Мелькановицкий, А. С. Орловский,

поверхность пород складчатого основания; 2 — линии разломов; 3 — гидрографическая поверхность перпендикулярного электрического сопротивления T_p гравийно-галечниковых отложений; 1 — различные значения T_p , Ом · м²: 3 — менее 100 000, 4 — от 100 000 до 200 000, 5 — более

счет поверхностных водотоков. Обычно линза «плавает» на соленых водах. В других случаях пресные воды ограничиваются снизу глинистым водоупором. Размеры линз самые разнообразные; условно считают, что размер малых линз не превышает нескольких квадратных километров, средних — измеряется десятками, а крупных — сотнями и тысячами квадратных километров. Линзы инфильтрационного питания имеют преимущественно изометрическую конфигурацию; линзы вдоль рек и каналов значительно вытянуты, ширина их достигает 0,5—2 км. Мощность зоны аэрации в пределах линз пресных вод колеблется от 1—3 м до нескольких десятков, а иногда превышает 100 м. Мощность водовмещающих пород линз измеряется единицами, а крупных — десятками метров (до 50 м и более).

В Советском Союзе с начала 50-х годов развернулись геофизические работы, связанные с поисками и разведкой линз пресных вод в аридной и полуаридной областях. Исследования проведены в Средней Азии, Казахстане, на юге Западной Сибири, в Зауралье, Заволжье, Калмыкии и др.

На этапе общих поисков линз пресных вод геофизическими методами выявляют эти линзы. Характеристики линз находят по данным ландшафтно-индикационных исследований (С. Г. Ларичева, 1974 г.) и результатам опробований по разрозненным скважинам и колодцам. Задачами детальных поисков являются: обнаружение и оконтуривание линз требуемых размеров, примерная оценка мощности водовмещающих пород, определение глубины до уровня грунтовых вод и приближенная оценка их минерализации.

На стадии предварительной разведки, кроме того, требуется: изучить литологический состав пород зоны аэрации с выделением участков с различными фильтрационными свойствами пород, оценить питание грунтовых вод через зону аэрации, приближенно определить площадное изменение фильтрационных свойств водовмещающих пород, установить, «плавают» ли линзы пресных вод в соленых водах, или залегают непосредственно на глинистом водоупоре, определить мощность и изменение состава пород регионального водоупора и дать заключение о возможности гидравлической связи грунтовых и напорных вод. При изучении приканальных линз пресных вод необходимо выявить вдоль рек и каналов участки, где идет интенсивный переток поверхностных вод в грунтовые.

Общие поиски проводятся лишь для выявления крупных линз пресных вод. Чаще всего используются имеющиеся материалы, ранее полученные при поисках нефти и газа. Наиболее информативными среди этих материалов являются ВЭЗ, ДЗ, сейсморазведка (КМПВ, МОВ и др.). Достаточно информативные материалы дают также геофизические исследования, выполненные при среднемасштабных гидрогеологических съемках. При отсутствии перечисленных материалов могут быть проведены маршрутные наблюдения методом ВЭЗ. Изучаемая при этом площадь измеряется десятками тысяч квадратных километров (табл. 7) и охватывает гидрогеологические крупные структуры. В конце 50-х годов при поисках крупных линз пресных вод на малоисследованных территориях Средней Азии использовались в комплексе с ВЭЗ также аэрогеофизические методы, в частности метод радиокип [20].

При общих поисках глубина исследований определяется не столько мощностью зоны пресных вод, сколько глубиной до регионального водоупора, обычно представленного мощными глинистыми толщами. Наиболее целесообразно при таких работах сочетать ВЭЗ с малыми разносами ($AB_{\max} = 1 \div 2$ км) с небольшим числом ВЭЗ с большими разносами (AB_{\max} до 4—5 км, иногда более). Остальные особенности методики рассмотрены в табл. 7.

При детальных поисках используются метод ВЭЗ, решающий все основные задачи, и сейсморазведка МПВ (КМПВ) в виде отдельных коротких профилей (типа точечных зондиро-

Таблица 7

Показатели геофизических работ методом ВЭЗ	Стадия исследований	Подпесчаные линзы		Приуровневые и прика- нальные линзы
		Крупные линзы	Мелкие и средние линзы	
Площадь исследований, км ²	Общие поиски Детальные поиски Предварительная разведка	10 000 <i>n</i> 1 000 <i>n</i> 100 <i>n</i>	— 100 <i>n</i> (1—10) <i>n</i>	— 100 <i>n</i> (1—10) <i>n</i>
Расстояние между про- филями, км	Общие поиски Детальные поиски Предварительная разведка	От 5—10 до 15—25 2—10 1—2	— 1—0,5 (реже 0,25) 0,5—0,15 (реже 0,1)	— 2—1 0,25
Шаг наблюдений вдоль профилей, км	Общие поиски Детальные поиски Предварительная разведка	2—5 2 (реже 1 или 5) 0,5—1	— 0,5—0,25 (реже 0,1) 0,25—0,10 (реже 0,25)	— 0,5—0,25 0,10 и меньше
Густота сети наблюде- ний, ф. т./км ²	Общие поиски Детальные поиски Предварительная разведка	0,004—0,01 0,02—0,5 0,5—1	— 2—40 10—200	— 1—4 40 и более
Результативный масштаб	Общие поиски Детальные поиски Предварительная разведка	1 : 200 000—1 : 500 000 и мельче 1 : 200 000, реже 1 : 100 000 1 : 50 000—1 : 100 000	— 1 : 50 000—1 : 25 000 1 : 25 000—1 : 10 000	— 1 : 50 000 1 : 10 000

ваний — ТЗ) для определения глубины до УГВ и попутного литологического расчленения разреза. При наличии в верхней части разреза высокоомных экранов (сухих песков) ВЭЗ можно заменить зондированием становления в ближней зоне (ЗСБЗ). Глубина исследований на поисковом этапе составляет для метода ВЭЗ обычно 100—200 м. Поэтому с помощью разносов $AB_{\max} = 1 \div 2$ км можно определить мощности линз пресных вод. Лишь незначительная часть ВЭЗ выполняется с большими разносами. При этом необходимо выявить в водоупоре гидрогеологические «окна».

При сравнительно однородных условиях и вытянутой конфигурации линз целесообразно сочетать метод ВЭЗ (или ЗСБЗ) с электропрофилированием (ЭП). По графикам ЭП можно оконтурить участки с пресными и солеными водами. Наиболее эффективны результаты двухразносного ЭП. При соответствующим образом подобранных разносах АВ удается фиксировать пресные воды по максимумам сопротивлений, соленые — по минимумам, причем в зависимости от типа кривых ВЭЗ пресные могут отмечаться на малых или на больших разносах. Важно подчеркнуть, что при выявлении контакта пресных вод с солеными ЭП зачастую является более чувствительным методом, чем ВЭЗ, поскольку частый шаг наблюдений позволяет лучше проследить контакт по небольшим изменениям сопротивлений даже тогда, когда типа кривых ВЭЗ не меняется.

При детальных поисках по методу ВЭЗ обычно используется прямоугольная или квадратная сеть наблюдений. При изучении малых линз, если в их пределах имеются колодцы с пресной водой, можно использовать веерную систему профилей с центром в этих колодцах. При использовании других методов можно руководствоваться следующими соображениями.

1. ЭП проводится с шагом наблюдений 50—100 м. Расстояние между профилями ЭП либо такое же, как намечено для профилей ВЭЗ, либо вдвое гуще (в зависимости от однородности условий). При постановке ЭП объем ВЭЗ, естественно, сокращается в несколько раз.

2. Точечные наблюдения МПВ (КМПВ) для определения глубины до УГВ выполняются с учетом имеющейся сети колодцев и скважин. Необходимо иметь несколько пунктов наблюдений в центральной части линзы, по ее периферии, а также за пределами. Вместе с данными электроразведки эти материалы должны послужить основой для построения карты гидроизогипс.

3. Оценка величины питания грунтовых вод через зону аэрации осуществляется в ограниченном числе пунктов — из расчета один—два на крупную линзу пресных вод. Положение этих пунктов уточняется по геофизическим и ландшафтно-индикационным данным.

На стадии предварительной разведки применяются те же методы, что и при детальных поисках, однако по более густой сети наблюдений. При этом роль ЭП и сейсморазведки заметно увеличивается. С помощью последней требуется зачастую не только изучить поведение зеркала грунтовых вод, но и провести более глубокие исследования, например выявить гидрогеологические «окна», выяснить природу низкоомного электрического горизонта, подстилающего толщу, связанную с пресными водами. Результаты сейсморазведки служат основой для интерпретации ВЭЗ. Сейсморазведку, учитывая ее высокую стоимость, целесообразно использовать лишь при изучении крупных линз пресных вод. Количество пунктов определения глубины до УГВ должно быть примерно в 3—5 раз меньше, чем пунктов ВЭЗ (см. табл. 7). При необходимости более глубоких исследований можно, по всей вероятности, обойтись прокладкой двух взаимно перпендикулярных профилей КМПВ, рассекающих изучаемую линзу.

Из других геофизических методов при предварительной разведке линз пресных вод иногда используются методы ЕП и ВЭЗ-ВП. Однако существенных положительных результатов с их помощью пока добиться не удалось (В. В. Галаган, 1976 г.). Исключение составляет применение метода ЕП с целью обнаружения гидравлической связи воды рек и каналов с прилегающими линзами. Видимо, необходима постановка опытно-методических работ.

Электроразведка является основным методом изучения линз пресных вод. Рассмотрим геоэлектрический разрез пустынных областей и особенности интерпретации кривых ВЭЗ. Как показывает опыт по многим регионам, в условиях песчано-глинистых разрезов устанавливаются достаточно стабильные электрические параметры пород. Так, сопротивление ρ песков зоны аэрации варьирует от 100 до 1000 Ом·м и выше. Эти же пески, насыщенные пресной и слабосоленой водой, имеют ρ , колеблющееся от 10—20 до 100—200, а насыщенные солоноватой и соленой водой — от 20—10 до 1—0,1 Ом·м. Наличие глинистого материала снижает сопротивление пород. В том же направлении действует засоление пород, которое особенно заметно сказывается в зоне аэрации. Сопротивления ρ песков, насыщенных минерализованными водами, и глин зачастую совершенно неотличимы.

При изучении геоэлектрических разрезов приходится наблюдать разнообразные типы кривых ВЭЗ, однако при этом можно выделить несколько наиболее характерных случаев [15, 25, 39 и др.]. Так, в условиях подпесчаных линз пресных вод фиксируются кривые ВЭЗ типа QQ, KQQ, KQ и др. Примечательным для них является постепенное снижение ρ_k с увеличением разносов АВ, причем в левой части кривых отмечаются высокоомные сухие пески, в средней — горизонт промежуточного

сопротивления, отвечающий пескам, насыщенным пресной водой, а в правой — толщина низкого сопротивления, обычно опорный электрический горизонт, соответствующий песчано-глинистым породам, насыщенным высокоминерализованными водами. При отсутствии линз пресных вод в описанных условиях фиксируются кривые либо двухслойные ($\rho_1 > \rho_2$), либо более сложные (К, КН и др.).

В условиях такыров наблюдаются обычно кривые ВЭЗ типа К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$), в которых первый горизонт соответствует глинистым породам, второй — пескам с пресными водами, третий — песчано-глинистым образованиям с солеными водами. На площади солончаков (шоров) кривые ВЭЗ характеризуют в наиболее простом варианте разрез типа А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$), в котором первый горизонт, имеющий сопротивление, измеряемое долями ом-метра, соответствует маломощным засоленным породам, второй (единицы ом-метров) — породам, насыщенным рассолами, третий — породам с менее минерализованными водами.

Как показывают исследования по ряду районов, изменения минерализации подземных вод M и сопротивления насыщенных ими пород $\rho_{п}$ по профилю постепенные. Так, между линзами пресных вод в пустынях и прибрежных зонах и окружающими их солеными водами существует переходная полоса, в пределах которой отмечаются градиентные изменения величин M и $\rho_{п}$. Иногда этот переход достаточно быстрый, хотя и плавный, что создает искажения кривых ВЭЗ.

В вертикальном разрезе представляет особый интерес изучение границ между породами с солеными и пресными водами. Верхняя граница, соответствующая зеркалу грунтовых вод, если она проходит в практически чистых песках, отмечается скачкообразным переходом сопротивлений, что обеспечивает удовлетворительные определения положения УГВ с помощью метода ВЭЗ. Наличие глинистых прослоев, засоленность грунтов и т. п. осложняют решение задачи и делают необходимым привлечение сейсморазведки МПВ, поскольку геоэлектрический переход от зоны аэрации к зоне грунтовых вод нечеткий.

Граница раздела, проходящая ниже УГВ между пресными и солеными водами (вне зависимости от их вертикальной последовательности), как правило, градиентная [25]. Это сказывается на характере фиксируемых кривых ВЭЗ. Так, например, если линза пресных вод «плавает» на соленых, отмечаются кривые типа Q или QQ (или более сложные), причем переход $\rho_{к}$ от одного слоя к другому более плавный, чем теоретически возможно при скачкообразном изменении сопротивлений. В такой ситуации использование обычных палеток Шлюмберже, Пылаева и других дает недостаточно точное решение задачи. Целесообразно применять специальные палетки, рассчитанные для условий градиентного изменения сопротивления слоев.

В качестве примера рассмотрим исследования, проведенные в 1970—1976 г. под руководством В. В. Галогана и др. в Туркмении при детальных поисках и предварительной разведке линз пресных вод в Ташаузском оазисе. Основное внимание уделялось наиболее крупным линзам пресных вод, связанным с притоками р. Амударьи и магистральными оросительными каналами. В пределах изученной части разреза выделены три толщи: а) верхняя — зона аэрации мощностью от 1,5—3 до 10—20 м, сложенная суглинками, супесями, глинами, песками, иногда солончаками; б) средняя — первый с поверхности водоносный комплекс мощностью от 50 до 200 м, представленный современными аллювиально-делювиальными отложениями (песками, супесями, суглинками с прослоями глин), насыщенный подземными водами пестрой минерализации — от 1 до 5—10 г/л и более; в) нижняя — водоупорный комплекс неоген-палеогеновых образований значительной мощности, сложенной преимущественно глинистыми породами.

На поисковой стадии требовалось выявить крупные линзы пресных вод и примерно оконтурить их, оценить мощность аллювиально-делювиальных водоносных пород и глубину до регионального водоупора и дать приближенную оценку минерализации грунтовых подземных вод. Геофизическая съемка выполнена на площади около 2000 км² в масштабе 1 : 50 000. Использован метод ВЭЗ с $AB_{\max}=1$ км по сети $2 \times 0,5$ км. В результате выявлено около 40 крупных линз пресных вод, примыкающих к магистральным каналам. Размеры линз $(1-5) \times (0,1-0,8)$ км при мощности обводненной пресными водами толщи от 10 до 25 м.

На стадии разведки более детально изучались обнаруженные линзы. Применен метод ВЭЗ с $AB_{\max}=0,5$ км. Масштаб исследований 1 : 10000—1 : 5000, общая площадь работ 600 км², сеть наблюдений $(0,25-1) \times (0,1-0,5)$ км. Установлено, что на большей части территории фиксируется геоэлектрический разрез, который в обобщенном виде может быть отнесен к типу QH, т. е. $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$, где ρ_1 — сопротивление пород зоны аэрации $(100-1000) \rho$ Ом·м; ρ_2 — сопротивление водоносных пород $(1-10) \rho$ Ом·м, опресненная часть которых имеет мощность 10—40 м; ρ_3 — сопротивление глин неогена совместно с засоленной частью аллювиально-делювиальных отложений $(1-3)$ Ом·м; ρ_4 — глинистые породы Р, являющиеся опорным электрическим горизонтом $(3-10)$ Ом·м). Во многих случаях разрез оказался более сложным. Зачастую зона аэрации состоит из 2—3 горизонтов, поэтому трудно проследить уровень грунтовых вод. Лишь большое число скважин облегчило задачу интерпретации. Очевидно, применение сейсморазведки с целью прослеживания УГВ совершенно необходимо. Основное внимание исследователи уделили оценке минерализации подземных вод. По большому числу скважин установлено наиболее вероятное соотно-

Таблица 8

Скважины	Минерализация, г/л					Итого
	<1,5	1,5-3	3-5	5-10	>10	
Контрольные в пределах выделенных зон минерализации	35	25	10	13	19	102
Подтверждающие геофизический прогноз, %	97,1	100,0	80,0	92,3	100	96,1

шение сопротивлений пород $\rho_{п}$ и минерализации M насыщающих их вод:

$\rho_{п}$, Ом·м	Более 19	19-9	9-5	5-3	Менее 3
M , г/л	Менее 1,5	1,5-3	3-5	5-10	Более 10

В результате послышной интерпретации и использования приведенных выше данных составлена карта минерализации подземных вод. Последующим бурением доказана высокая достоверность результатов (табл. 8).

В качестве примера поисковых работ при изучении линз пресных вод укажем на исследования, проведенные ВСЕГИН-ГЕО совместно с Гидрогеологическим управлением МГКазССР на площади восточных Кызылкумов [15].

3.5. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ЛЕДНИКОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В центральных и северных районах европейской части РСФСР, в Белоруссии, Прибалтике и в центральной части Западной Сибири широкое распространение получили отличающиеся высокой водообильностью четвертичные ледниковые отложения, представленные песками, гравием, галечниками и моренными суглинками. Общая мощность ледниковых отложений достигает 100—200 м, иногда более. Они покрывают мощным чехлом водораздельные пространства (это так называемые зандры). В погребенных долинах ледниковые отложения перемежаются с аллювиальными, здесь они образуют особый тип месторождений, который рассмотрен выше (см. раздел 3.2). В отличие от погребенных долин, месторождения ледниковых отложений, распространенные на водораздельных пространствах (т. е. месторождения собственно ледникового типа), характеризуются изометрической конфигурацией. Связь подземных вод ледниковых отложений этого типа с подземными водами коренных отложений, как правило, слабая. Для ледниковых отложений характерно этажное расположение моренных и флювиогляциальных толщ. Первые являются водоупорами, вторые — водовмещающими породами; эффективная мощность последних

достигает 50—100 м. Типична резкая изменчивость мощностей и литологического состава как водоносных, так и водоупорных толщ. Обычно в разрезе имеется один водоносный горизонт, перекрываемый и подстилаемый суглинистыми моренными образованиями. Реже встречаются два горизонта; как правило, они гидравлически связаны через морену на участке, где она обогащена песком, гравием. Особенно интенсивная гидравлическая связь отмечается через древние долины. Образование гидрогеологических «окон» в подстилающих водоупорах иногда приводит к подтоку снизу соленых вод.

При общих поисках месторождений подземных вод ледниковых отложений с помощью геофизических методов требуется: оценить мощность четвертичных отложений; оконтурить площади, где преобладают в этих отложениях грубообломочные породы; выявить и проследить древние ложбины стока. На стадии детальных поисков, кроме того, необходимо: расчленить разрез ледниковых отложений на моренные суглинки и песчано-гравийно-галечниковые флювиогляциальные образования и проследить, как меняются их мощность и в общих чертах состав в пределах изучаемой площади; определить глубину до глинистых пород регионального водоупора и до поверхности неглубокозалегающих карбонатно-галогенных пород; приближенно оценить фильтрационные свойства водовмещающих пород основного водоносного горизонта. При предварительной разведке, когда уже намечены основные участки будущих водозаборов, желательно: детально изучить строение верхней морены; оконтурить в ее пределах гидрогеологические «окна»; исследовать песчано-глинистые отложения, подстилающие основные водоносные горизонты, и установить, имеются ли в них гидрогеологические «окна», имеет ли место подток соленых вод из глубоких водоносных горизонтов в ледниковые образования; определить положение уровня грунтовых вод. Во многих случаях детальными поисками завершаются полевые геофизические исследования.

Судя по двадцатилетнему опыту работ в центральных районах РСФСР и Белоруссии (А. И. Бабий, 1973 г.; А. И. Бобринев, 1973 г.; Н. Н. Шарапанов, 1978 г. и др.), основным, а на поисковой стадии и единственным методом исследований является ВЭЗ; он иногда дополняется методом ВЭЗ-ВП и сейсморазведкой КМПВ (МПВ). Попытки привлечения других методов — низкочастотных зондирований (НЧЗ), метода ЕП и т. п. — не дали существенных результатов.

Геоэлектрический разрез ледниковых отложений отличается значительной изменчивостью по площади и чередованием в разрезе большого числа высоко- и низкоомных горизонтов, соответствующих песчаным водоносным и суглинистым водоупорным толщам. Это способствует в условиях меняющегося положения УГВ созданию сложных многослойных кривых ВЭЗ типа

КQ, НКНҚQ и др. Наиболее четко на кривых ВЭЗ выделяются днепровско-московские флювиогляциальные водоносные отложения — обычно в виде максимума ρ_k .

Сложность геоэлектрических условий приводит к тому, что для изучения водно-ледниковых отложений можно применять лишь метод ВЭЗ, обеспечивающий детальное послойное расчленение разреза, причем его постановка требует густой сети наблюдений. Однако на отдельных участках (болотные массивы и конечно-моренные гряды) условия становятся столь сложными, что ВЭЗ следует дополнять другими методами.

Эксперименты, проведенные в последние годы с применением ВЭЗ-ВП, показали, что в сложных условиях этот метод может существенным образом дополнить обычные зондирования ВЭЗ как в части расчленения разреза, так и в отношении оценки его фильтрационных параметров. Кривые ρ_k и η_k по-разному отражают разрез. Особенно это заметно в условиях распространения высокоомных конечно-моренных отложений московского ледника, представляющего собой экран для постоянного тока; в то же время по кривым η_k удается выделить в разрезе днепровско-московский водоносный горизонт. В таких условиях глубинность метода ВП оценивается в 40—60 м.

При проведении сейсмических наблюдений (А. И. Бабий, 1973 г.) хорошо прослежена преломленная волна от поверхности грунтовых вод. Иногда удается выделить слабоинтенсивную преломленную волну от кровли моренных отложений московского ледника с $v_r = 2,2 \div 2,5$ км/с. Наблюдаются также отраженные волны от более глубоких горизонтов, но природа их не выяснена.

В табл. 9 приведены основные показатели методики полевых геофизических наблюдений. Вопрос о сети наблюдений методами ВП и МПВ (КМПВ) еще недостаточно изучен. Судя по материалам А. И. Бобринева и А. И. Бабя, ВЭЗ-ВП следует выполнять на отдельных участках с такой же густотой, что и ВЭЗ. Наблюдения же МПВ (КМПВ) можно вести в виде точечных зондирований (ТЗ) по тем же профилям, что и электроразведку, однако шаг наблюдений, видимо, следует увеличить по сравнению с ВЭЗ в 2—3 раза.

Весьма ценные исследования проведены при оценке водообильности пород. Для этого использованы как ВЭЗ, так и ВЭЗ-ВП.

В настоящее время получена оценка наиболее важных результатов геофизических работ, связанных с изучением подземных вод в районе г. Минска и на других участках в аналогичных условиях (В. И. Бобринев и др., 1978 г.). Примерно две трети контрольных скважин подтвердили наличие горизонтов, выявленных по геофизическим данным; мощность их оценена с погрешностью $\pm 10\%$. Наибольшие погрешности отмечены в зоне выклинивания горизонтов. Погрешность в определении

Таблица 9

Показатели геофизических работ	Стадии работ		
	Общие поиски	Детальные поиски	Предварительная разведка
Площадь исследований, км ²	1000л	100л	10—40
Глубина исследований, м	От 100—200 до 300—400	100—200	100—200
Метод ВЭЗ:			
разносы AB_{\max} , км	1—2, отдельные пункты до 3—4	1—2	1—2
расстояние между профилями, км	2—4	1—2	0,5—1
шаг наблюдений, км	1	0,5—1	0,25—0,5
густота сети наблюдений, ф. т./км ²	0,25—0,5	0,5—1	2—5
Дополнительные методы исследований (в сложных условиях)	—	ВЭЗ-ВП, МПВ (КМПВ)	ВЭЗ-ВП, МПВ (КМПВ)
Результативный масштаб	1 : 200 000— 1 : 100 000	1 : 50 000	1 : 25 000

глубины до днепровской морены, являющейся региональным водоупором, составляет $\pm 20—25\%$. Есть основание предполагать, что на стадии разведки за счет более густой сети наблюдений и привлечения дополнительных методов погрешность результатов геофизических исследований может быть существенно уменьшена.

3.6. ПЛАСТОВО-ПОРОВЫЕ НАПОРНЫЕ ВОДЫ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ

Около половины территории всех артезианских бассейнов занято бассейнами с терригенным типом разреза осадочного покрова. К ним приурочены месторождения пластово-поровых напорных вод. Они широко распространены в Западной Сибири, Средней Азии, Причерноморье, Приазовье, на Дальнем Востоке, а также в Центральных районах РСФСР (в условиях глубокого погружения карбонатного комплекса пород). Существует несколько гидрогеологических классификаций артезианских бассейнов [41 и др.]. С позиций разведочной геофизики наиболее важные различия намечаются для месторождений платформенных бассейнов, с одной стороны, и месторождений межгорных и предгорных бассейнов, с другой.

Глубина разведки в условиях артезианских бассейнов обычно составляет 100—300 м, иногда увеличивается до 500—800 м и более, особенно в краевых частях платформенных бассейнов и в межгорных бассейнах, где распространена мощная зона пресных вод.

Большое значение при исследовании месторождений артезианских бассейнов приобретает изучение региональных водоупоров. Верхний водоупор определяет гидравлическую связь изучаемого горизонта (комплекса) с грунтовыми и поверхностными водами, нижний — с глубокими напорными водами. В одних случаях нижний водоупор проявляется достаточно четко и является границей пресных и соленых вод. В других случаях водоупоров нет, и граница пресных и залегающих глубже минерализованных вод проходит в мощной водоносной толще; разведка таких месторождений осложняется.

Для крупного водоснабжения обычно требуется выявить несколько перспективных участков. Они должны быть расположены друг от друга на расстоянии 10—30 км. Площадь каждого участка измеряется десятками, а иногда и сотнями квадратных километров. Поэтому для обнаружения участков будущих водозаборов необходимо изучить значительную площадь — в радиусе 20—50 км от будущего потребителя, что составит 1000—5000 км² и более.

Опыт практического использования геофизических методов при гидрогеологическом изучении артезианских бассейнов такого типа свидетельствует о возможности применения их на стадиях как поисков, так и разведки.

Перед полевыми геофизическими методами на стадии поисков и предварительной разведки могут быть поставлены следующие задачи: изучение тектоники артезианского бассейна с выявлением основных его складчатых и разрывных структур и исследованием гипсометрии фундамента (складчатого основания) и других важных опорных горизонтов; оконтуривание по площади важнейших напорных водоносных комплексов, определение их глубин залегания и мощности; разграничение площадей, где циркулируют в изучаемых комплексах пресные и соленые воды; определение мощности зоны пресных вод при отсутствии надежных водоупоров, подстилающих целевой горизонт; характеристика водоупорных толщ, перекрывающих и подстилающих водоносные комплексы, определение их мощности и состава, выявление гидрогеологических «окоп»; сравнительное изучение состава и фильтрационных свойств пород зоны аэрации на участках, где возможны дополнительное питание или разгрузка артезианских вод; гидрогеологическое изучение водоносных горизонтов, залегающих выше и ниже целевых комплексов (горизонтов), выявление гидравлической связи с ними, особенно в зоне речных долин, озер и других водоемов; сравнительная (а иногда и полуколичественная) оценка фильтрационных свойств пород основных водоносных комплексов.

На стадии общих поисков основное внимание уделяется первым двум задачам. Попутно, если это позволяют имеющиеся в наличии геофизические материалы, могут быть весьма приближенно разрешены и некоторые другие задачи. Общие поиски

осуществляются, как правило, без специальной постановки полевых работ: для этого имеются готовые материалы [15].

При детальном поиске разрешаются остальные задачи. При наличии хорошо проведенных геофизических исследований, сопровождавших среднemasштабную гидрогеологическую съемку, и детальные поиски можно осуществить без специальной постановки полевых работ. Однако зачастую глубинность и полнота ранее выполненных геофизических исследований недостаточны, и приходится проводить специальные работы: электроразведку, иногда сейсмо- и гравиразведку.

При предварительной разведке особое внимание уделяется исследованию фильтрационных свойств пород и изучению гидравлической связи напорного горизонта с грунтовыми и поверхностными водами. В ряде случаев сложность задач и ограниченность возможностей геофизических методов не позволяют на стадии разведки (особенно в платформенных условиях) добиться более детальных результатов по сравнению со стадией поисков даже за счет сгущения сети наблюдений. Привлечение же в большом объеме дополнительных методов (в частности, сейсморазведки) может настолько удорожить работы, что геофизические методы проигрывают по сравнению с традиционными. Поэтому иногда приходится либо вообще отказаться от наземной геофизики, либо ограничить ее участие лишь при изучении верхней части разреза.

В зависимости от особенностей строения артезианских бассейнов разрешение тех или иных задач приобретает важное значение. Так, при изучении межгорных артезианских бассейнов особое внимание уделяется исследованию тектоники. При исследовании малых межгорных бассейнов объектом изучения становится весь бассейн, поскольку при эксплуатации артезианских вод он целиком будет вовлечен в сферу воздействия водозабора. Поиски и разведка подземных вод в пустынных областях требуют особого внимания к изучению первого от поверхности водоносного горизонта, часто связанного с крупными подбарханскими линзами пресных вод. При отсутствии глубокого регионального водоупора возникает важная задача определения мощности зоны пресных вод. Если в разрезе бассейна имеются галогенные породы, то требуется выявить возможности гидравлической связи глубоких водоносных горизонтов, насыщенных солеными водами, с водоносными горизонтами с пресными водами и оконтурить участки различной минерализации подземных вод изучаемой водоносной толщи.

Необходимость глубоких исследований на значительной площади делает метод ВЭЗ (ДЗ) незаменимым при изучении артезианских бассейнов. Однако в сложных условиях, когда геоэлектрический разрез слабо дифференцирован, мощность горизонтов невелика по сравнению с глубиной их залегания и опорных скважин недостаточно, желательно привлечение сейс-

моразведки, чаще всего КМПВ. Этот метод также используется для определения уровня грунтовых вод, особенно там, где имеется мощная зона аэрации. Иногда, однако, более эффективным (в зависимости от сейсмогеологических условий района) является МОВ.

В табл. 10 приведены основные показатели методики полевых геофизических исследований на различных стадиях изучения месторождений рассматриваемого типа. Следует обратить внимание на следующие особенности.

1. Как правило, на всех стадиях используется площадная съемка, при которой профили (маршруты) ориентированы вкрест простирания основных структур рыхлого покрова.

2. В межгорных впадинах в связи со сложностью тектоники и более резкими изменениями гидрогеологических параметров сеть наблюдений почти на порядок гуще, чем в артезианских бассейнах платформенного типа. Как правило, в этих впадинах больше и глубина исследований.

3. Сейсморазведка в большой мере используется в условиях платформенных бассейнов, в разрезах которых имеет место чередование пластов малой мощности, что ограничивает возможности электроразведки. Напротив, в межгорных артезианских бассейнах, где отмечаются большая контрастность структур и наличие с поверхности грубообломочных пород, применение сейсморазведки зачастую становится затруднительным, в то время как гравиметрия может быть использована с большим эффектом, особенно в комплексе с методом ВЭЗ. По данным гравиметровых съемок межгорных впадин масштаба 1 : 100 000—1 : 50 000 с сечением изоаномал $(1,0—0,5) 10^{-5}$ м/с² можно хорошо трассировать разломы, выявлять скрытые структуры в осадочном покрове, изучать гипсометрию складчатого основания (фундамента) впадин.

4. При предварительной разведке, особенно при изучении межгорных артезианских бассейнов, наряду с глубинными исследованиями, большое значение приобретает изучение приповерхностной части разреза. Для этого на отдельных участках по густой сети наблюдений могут быть использованы малоуглубинные методы, примененные при разведке других вышерассматриваемых типов месторождений (ВЭЗ с малыми разносами, ЭП, ЕП, ВЭЗ-ВП и др.).

Остановимся на некоторых специфических вопросах интерпретации геофизических данных, возникающих при изучении месторождений подземных вод артезианских бассейнов: на детальном расчленении и прослеживании по площади глубоких водоносных и водоупорных горизонтов; гидрогеохимической характеристике глубоких водоносных горизонтов; изучении фильтрационных свойств пород разреза.

При детальном расчленении разреза терригенных пород артезианских бассейнов на значительных глубинах могут быть

Таблица 10

Показатели геофизических работ	Стадии работ при изучении артезианских бассейнов					
	платформенного типа	межгорного типа	платформенного типа	межгорного типа	платформенного типа	межгорного типа
	Общие поиски		Детальные поиски		Предварительная разведка	
Глубина исследований, м	500—1000 и более	До 1000—2000	200—500	До 500—1000	200—500	До 500—1000
Площадь съемки, км ²	(100 000—1 000 000) <i>n</i>	(100—1000) <i>n</i>	(1000—10 000) <i>n</i>	(100—1000) <i>n</i>	(100—1000) <i>n</i>	(10—100) <i>n</i>
Использование имеющихся (готовых) материалов	Используются, как правило, фондовые материалы: электро-, сейсмо-, грави- и магниторазведка		Используются материалы среднemasштабных съемок, зачастую дополненные специальными полевыми работами		Как правило, ставятся специальные полевые наблюдения	
Метод ВЭЗ:						
разносы AB_{\max} , км	До 5—10 и более	До 10 и более	2—5	До 5—10	2—5	До 5—10
расстояние между профилями, км	20—50	5—10	5—10	2—5	2—5	0,5—1
шаг наблюдений, км	5—10	1—2	2—5	0,5—1	1—2	0,25—0,5
средняя густота сети наблюдений, ф. т./км ²	0,002—0,01	0,05—0,2	0,02—0,10	0,2—1,0	0,1—0,5	2—8
Дополнительные методы исследований	—	—	КМПВ, реже МОВ	КМПВ, реже МОВ, иногда гравиметровая съемка	КМПВ или МОВ, ВЭЗ-ВП, ЕП	Иногда КМПВ или МОВ, ВЭЗ-ВП, ЕП
Результативный масштаб	1 : 500 000—1 : 1 000 000	1 : 200 000—1 : 100 000	1 : 200 000—1 : 500 000	1 : 100 000—1 : 50 000	1 : 200 000—1 : 100 000	1 : 50 000—1 : 25 000

использованы методы ВЭЗ и сейсморазведка. Задача обоих методов заключается в выделении основных водоносных (песчано-гравийных) и водоупорных (глинистых) комплексов. Методом ВЭЗ удается, как правило, хорошо проследить поверхность глинистых толщ — региональных водоупоров. Значительно сложнее в таких условиях зафиксировать подошву пород регионального водоупора. Дело в том, что часто песчанистые породы под водоупором насыщены водами повышенной минерализации и по электрическому сопротивлению они слабее отличаются от вышележащих пород. Лишь тогда, когда воды характеризуются невысокой минерализацией и водоносный комплекс имеет значительную мощность, по ВЭЗ, пользуясь обычными приемами интерпретации, можно проследить нижнюю границу регионального водоупора и подошву артезианского комплекса. В большинстве же случаев приходится прибегать к специальным приемам. Одни из них заключаются в использовании способа нормированных разностей или производных, разработанного М. А. Киричек (1971 г.).

Расчленение на отдельные комплексы толщи терригенных пород, залегающих ниже мощного регионального водоупора, сложенного глинистыми породами, является, как правило, неразрешимой задачей для ВЭЗ¹. В то же время нетрудно расчленить такой разрез с помощью сейсморазведки КМПВ и МОВ. Например, в Западной Сибири по данным сейсморазведки можно хорошо проследить все основные водоносные и водоупорные комплексы. Особенно большими возможностями обладают методы отраженных волн (в комплексе с вертикальным сейсмическим профилированием ВСП), общей глубинной точки (ОГТ) и т. п. Важную дополнительную информацию можно получить при изучении зональности сейсмических полей (в частности, зональности прослеживаемости промежуточных отражений между опорными горизонтами, зональности эффективных скоростей и т. п.). Большими возможностями обладают также методы каротажа при расчленении разреза и прослеживании водоносных и водоупорных толщ по площади бассейна. Могут быть использованы данные как гидрогеологических, так и опорных, нефте-разведочных и других скважин. Об этом свидетельствуют результаты исследований в Приташкентском, Ферганском, Прикаспийском, Иртышском и других артезианских бассейнах (И. М. Мелькановицкий, 1969 г.; Н. Н. Горленко, 1977 г.; Ю. А. Осянин, 1973 г. и др.).

Гидрогеохимические исследования геофизическими методами включают районирование территории с выделением площадей, где преобладают пресные либо соленые воды, определе-

¹ Определенные возможности в этом отношении открываются перед методом ЗСБЗ (А. Н. Родионов, 1979 г.).

ние мощности зоны пресных вод и количественную оценку минерализации подземных вод.

Наиболее общие представления о гидрохимических условиях крупных регионов (а это требуется на этапе предварительных поисков месторождений) можно получить на основе тектонического анализа. Более конкретную характеристику дают сведения о геоэлектрическом разрезе. Наиболее простым является изучение распределения по площади величины суммарной продольной проводимости S_{Σ} (либо продольного сопротивления ρ_l) осадочной толщи. Карты S_{Σ} (и ρ_l) можно составить по данным практически всех электроразведочных методов, ориентированных на глубинное изучение разреза, — ВЭЗ, ДЗ, МТЗ, МТП, ТТ, ЧЗ и др. Как известно, $S_{\Sigma} = H/\rho_l$, где H — полная площадь осадочного покрова. Участки увеличенных значений S_{Σ} , как правило, характеризуются более глинистым составом, большей мощностью водоупорных толщ и соответственно более высокой минерализацией артезианских вод. Дополнительную информацию дают карты аномальных значений S_a [15].

Для изучения локальных участков, когда изменение минерализации подземных вод глубоких горизонтов сопровождается структурными дислокациями и соответственно изменениями геоэлектрической обстановки, целесообразно использовать методику нормированных разностей (производных) М. А. Киричек. Эффективность таких построений хорошо доказана исследованиями К. С. Гумарова (1971 г.) по Западной Туркмении. В отличие от способа S_a , в методе нормированных разностей не требуется фиксация опорного горизонта практически бесконечного сопротивления.

Оценку мощности зоны пресных вод можно наиболее надежно осуществить с помощью метода ВЭЗ, когда в ее разрезе отсутствуют низкоомные или высокоомные экраны и она подстилается аналогичными образованиями, насыщенными водой высокой минерализации. Так, например, в Волго-Камском районе мощность зоны пресных вод можно оценить, когда нижняя граница ее проходит в толще пород верхнего терригенного комплекса. В этом случае фиксируются кривые типа $\rho_1 \leq \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 \rightarrow \infty$, где ρ_1 — сопротивление поверхностных отложений, ρ_2 — сопротивление терригенных пород, насыщенных пресными водами, ρ_3 — сопротивление низкоомных терригенных пород с высокоминерализованными водами, ρ_4 — сопротивление опорного электрического горизонта (карбонатно-галогенных пород). Аналогичная картина наблюдается на Сахалине (Л. Д. Карнов, 1970 г.), во внутренней зоне Предкарпатского прогиба, в восточной части Западной Сибири [15] и других местах. Следует иметь в виду, что низкоомными могут быть также глинистые образования. Поэтому для однозначности интерпретацию ВЭЗ целесообразно сочетать с данными бурения или сейсморазведки.

При благоприятных условиях представляется возможным дать количественную оценку минерализации напорных вод. Если, например, фундамент залегает на глубине до 500—600 м, а водоносный напорный комплекс обладает значительной мощностью и перекрыт маломощным водоупором, то минерализацию можно оценить по величине минимума ρ_k , фиксируемого на кривой ВЭЗ. Такая ситуация имеет место в Мангышлакском (Ю. А. Осянин, 1970 г.), Тургайском, Сырдарьинском и других бассейнах.

Не всегда удается, пользуясь обычными приемами интерпретации, выделить нужный водоносный комплекс и оценить его сопротивление ρ' и мощность h' . Зачастую напорный комплекс залегает под региональным водоупором (обладающим сопротивлением ρ'' и мощностью h'') и фиксируется на кривых ВЭЗ совместно с последним в виде единой геоэлектрической толщи (имеющей сопротивление ρ_z). Задача иногда может получить практическое разрешение при использовании данных каротажа отдельных скважин для установления отношения сопротивлений $\rho''/\rho' = \mu$ и результатов сейсморазведки для определения отношений мощностей $h''/h' = \nu$.

Изучение фильтрационных свойств пород и гидродинамики напорного подземного потока — наиболее сложная задача. Здесь целесообразно использовать как косвенные, так и прямые решения. Выяснение по геофизическим данным тектоники бассейна и его гидрохимической обстановки уже позволяет сделать ряд важных предварительных заключений. Так, например, глубокое погружение водоносных горизонтов, отсутствие дизъюнктивных нарушений в рыхлом покрове, увеличение мощности региональных водоупоров при обогащении их глинистым материалом, уменьшение мощности водоносных горизонтов — все это факторы, свидетельствующие о снижении водообильности артезианских комплексов. Повышение минерализации подземных вод также обычно является косвенным подтверждением ухудшения фильтрационных свойств пород.

Для сравнительной (полуколичественной) оценки фильтрационных свойств пород, как известно, необходимо изучение их геофизических параметров. При большой мощности напорных горизонтов (комплексов) и малой глубине их залегания для оценки коэффициентов фильтрации K_f либо водопроницаемости K_m можно использовать ранее описанные приемы интерпретации электроразведочных данных. В более сложных случаях такой подход, однако, не может обеспечить даже минимальных требований к точности результатов. Например, литификация пород, связанная с локальным их уплотнением, приводит к резкому увеличению электрического сопротивления ρ и соответственно поперечного сопротивления T_z , в то время как величины K_f и K_m могут даже уменьшиться. Выявить аномальные явления можно путем дополнительного анализа скоростной

характеристики разреза. Например, зональное уплотнение пород приводит к возрастанию пластовых (и эффективных) скоростей в породах. На таких участках использование корреляционных связей вида $\rho(K_{\phi}$ или $T_{\phi}(Km)$), естественно, недопустимо. Для оценки фильтрационных свойств пород артезианских глубокозалегающих комплексов необходимо пользоваться многочисленными корреляционными связями, учитывающими как геофизические параметры этих комплексов (ρ , $v_{пл}$), так и глубину залегания, минерализацию насыщающих их вод, а также мощность и литологический состав (или фильтрационные свойства) перекрывающих водоупорных толщ.

Водоупорные свойства однородных глин достаточно хорошо могут быть изучены методом ВЭЗ на основании анализа их мощности h , величины сопротивления ρ и продольной проводимости S . Для этих пород фильтрационные свойства, как правило, улучшаются с обогащением их песком и соответственно увеличением электрического сопротивления ρ . Уже накоплен достаточно большой опыт изучения таким способом региональных глинистых водоупоров по многим районам страны [15]. Особенно эффективно использование параметра $S=h/\rho$, позволяющего дать сравнительную характеристику фильтрационных свойств слабопроницаемых толщ даже тогда, когда они представляют собой переслаивание литологических глинистых и песчаных горизонтов. Например, исследования верхнего терригенного комплекса Московского артезианского бассейна показали, что его проводимость S коррелируется с суммарной мощностью глинистых прослоев, а это достаточно надежный показатель проницаемости указанной толщи.

В настоящее время доказана также возможность полуколичественной оценки фильтрационных свойств глинистых пород (преимущественно морского происхождения) на базе установленной корреляционной связи между их значениями K_{ϕ} и ρ . Во многих случаях эта связь может быть описана уравнением

$$K_{\phi} = A\rho^{\alpha}. \quad (2)$$

Здесь A и α — постоянные величины, более или менее стабильные для определенных районов, однородных в геологическом отношении.

В качестве примера вышеописанных исследований укажем на результаты геофизических работ в Сырдарьинском артезианском бассейне платформенного типа, произведенные на этапе общих поисков [15].

4. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ И ТРЕЩИННО- ПЛАСТОВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

4.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ

С позиций разведочной геофизики в группу месторождений трещинно-карстовых и трещинно-пластовых подземных вод целесообразно включить месторождения четырех основных типов: а) трещинно-жильных вод изверженных и метаморфических пород, б) трещинно-грунтовых вод карбонатных отложений, в) трещинно-пластовых вод базальтовых покровов и г) пластово-трещинных вод артезианских бассейнов (см. рис. 9).

При исследовании массивных пород гидрогеологи и геофизики изучают в основном их трещиноватость. Трещиноватость породы зависит от многих факторов: от ее генезиса и истории геологического развития, тектонической приуроченности района; мощности, глубины залегания и состава пород, в которых развита трещиноватость; мощности и состава перекрывающих и подстилающих образований, характера земной поверхности и наличия поверхностных водотоков; особенностей климата; современных и палеогидрогеологических условий и др.

Верхняя наиболее трещиноватая зона скальных пород, обусловленная экзогенными процессами, приурочена к речным долинам, оврагам, балкам; на водоразделах она резко сокращается. Зоны тектонической трещиноватости также часто тяготеют к этим формам рельефа. Поэтому водозаборы, эксплуатирующие трещинные грунтовые воды, обычно располагаются в долинах рек, где используют подземные воды как трещинных коренных пород, так и грубозернистых аллювиальных отложений.

Месторождения подземных вод, приуроченные к трещиноватым породам, отличаются большим разнообразием. Повышенная водообильность отмечается: а) непосредственно в зонах тектонических нарушений, секущих самые разнообразные породы; б) в узких полосах трещиноватых (закарстованных) пород, залегающих среди непроницаемых пород; в) в зоне тектонических контактов пород различного литологического состава; г) на периферических участках интрузий в контакте с вмещающими породами.

Зоны тектонической трещиноватости характеризуются четким линейно-вытянутым характером. Они прослеживаются на километры, а иногда на десятки и даже сотни километров, особенно если связаны с глубинными разломами. Ширина их обычно небольшая: десятки, иногда первые сотни метров,

в редких случаях до 5—10 км. Последнее типично для зон региональных разломов. Зоны экзогенной трещиноватости, будучи привязанными к долинам рек и временных водотоков, не имеют столь вытянутой конфигурации, они более широкие.

Трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды в гумидной зоне обычно отличаются низкой минерализацией. В аридной зоне они (особенно трещинно-грунтовые воды) могут иметь повышенную минерализацию. Глинистые образования, перекрывающие сверху трещиноватые породы, резко ухудшают инфильтрацию атмосферных осадков в эти породы и способствуют повышенной минерализации подземных вод.

Температура подземных вод, циркулирующих в зоне экзогенной трещиноватости, мало отличается от температуры пород на этой же глубине за пределами трещиноватости. Подземные воды тектонических нарушений, напротив, иногда имеют аномально-высокую температуру, что связано с притоком их с больших глубин. Последние также отличаются от первых тем, что в ряде случаев приобретают напор.

При изучении массивных пород нашли применение все виды полевых геофизических методов: электро-, сейсмо-, грави-, магнито-, терморазведка и радиометрия [4, 8, 14, 21, 22, 23, 24, 30, 32, 36, 43 и др.].

Возможность изучения трещиноватости пород геофизическими методами основана прежде всего на заметном изменении физических свойств и наблюдаемых геофизических полей над этими породами по сравнению с ненарушенными массивами, создающими естественный геофизический фон. С другой стороны, о трещиноватости и водообильности пород можно делать заключения по косвенным признакам структурно-геологического порядка. Например, вблизи разломов, в сводах антиклинальных структур, увеличивается трещиноватость пород. Таким образом, определение водообильности и некоторых других характеристик трещиноватых пород — сложная многоплановая задача. Ее невозможно решить одним приемом без изучения всей совокупности природных явлений, сопутствующих процессу обводнения скальных пород.

К числу задач, решаемых при подобных исследованиях полевыми геофизическими методами, можно отнести определение мощности и состава рыхлых отложений, перекрывающих скальное основание (попутно прослеживание древних погребенных долин), геологическое картирование этого основания с оконтуриванием потенциально наиболее обводненных пород, выявление и прослеживание зон разломов и многие другие. Решение каждой задачи освещает одну из сторон изучаемого явления, совместное их решение позволяет оценить водообильность пород, установить объемное изменение ее в контурах изучаемой площади.

Из экономических соображений на поисковых этапах геофизических исследований главное внимание уделяется косвенным признакам. При последующих наблюдениях привлекаются главным образом прямые признаки, что позволяет переходить от общих характеристик к конкретной оценке водообильности пород узлокалелизованных участков. Однако не всегда можно провести четкую грань между прямыми и косвенными признаками трещиноватости пород по геофизическим данным.

Ниже рассматриваются приемы интерпретации при изучении массивных пород. Все частные задачи объединены в несколько однородных групп. В соответствии с этапами исследований вначале рассматриваются задачи, имеющие в основном геологическое значение, далее излагается решение задач, связанных с изучением отдельных гидрогеологических вопросов; на заключительном этапе дается синтез всех ранее изложенных решений, позволяющий решить основной вопрос — выделить участки наиболее водообильных пород.

Определение мощности и состава рыхлых отложений, изучение гипсометрии их подошвы. Мощность и состав рыхлых образований, перекрывающих скальные образования, решающим образом влияют на характер и интенсивность трещиноватости и закарстованности скальных пород. Чем значительнее мощность рыхлого покрова и чем более глинистыми отложениями он представлен, т. е. чем хуже его фильтрационные свойства, тем меньше трещиноватость коренных пород и тем менее они водообильны. По изменениям мощности и состава рыхлого покрова можно также судить о некоторых других характеристиках скальных пород. Например, наличие погребенных долин и других эрозионных форм древнего рельефа, заполненных грубообломочным материалом, является прямым показателем высокой водообильности коренных пород. Молодые разломы, гидрогеологическая роль которых особенно высока, обычно обнаруживаются по резким изменениям мощности рыхлых осадков. Зачастую зоны разломов проявляются в виде узких «карманов», заполненных как рыхлыми, так и трещиноватыми породами основания. Изучение гипсометрии, т. е. абсолютных отметок фундамента, позволяет иногда выяснить, чем этот фундамент сложен; например, карбонатные толщи отличаются среди сланцев несколько гипсометрически приподнятым положением. Наконец, при унаследованном характере тектоники можно, изучив гипсометрию погребенной поверхности скальных пород (при слабом влиянии процессов эрозии), выявить антиклинальные структуры, отмечающиеся повышенной трещиноватостью.

По геофизическим данным удается зачастую проследить суммарную мощность рыхлых и разрушенных пород. Это позволяет изучить гипсометрию поверхности монолитных ненарушенных пород. Как показали исследования на Украинском щите

[30] и в других областях, эта поверхность является *ложем подземного стока*, а следовательно, здесь концентрируются подземные воды. Намечается определенная аналогия между такими ложами в скальных породах и древними погребенными долинами, высокая стабильность которых хорошо известна.

Для изучения мощности рыхлых отложений (и гипсометрии их подошвы) используются электроразведка постоянным током (ВЭЗ, ЕП), сейморазведка (МПВ, КМПВ), реже гравиметрия, магниторазведка и др. Особенности применения этих методов при решении рассматриваемой задачи описаны выше, в разделе 3.1.

Литологическое картирование поверхности скальных пород. Оно заключается в прослеживании границ между различными литологическими комплексами. При картировании скальных пород с гидрогеологическими целями основное внимание исследователей направлено на разделение их на потенциально водообильные (более трещиноватые) и неводообильные (слаботрещиноватые) породы. К числу первых обычно относятся карбонатные породы, гранитоидные интрузивы, кайнотипные эффузивы и др., ко вторым — сланцы, метаморфические толщи, палеотипные эффузивы. Этот набор пород в различных районах может меняться. Иногда магматические породы одного и того же состава, но различного возраста резко отличаются по водообильности. Практически подавляющее большинство геофизических методов способствует решению этой задачи, причем чем меньше мощность рыхлого покрова, чем он однороднее, тем легче и детальнее решение.

При анализе геофизических полей необходимо использовать максимум диагностических признаков, характеризующих те или иные породы; знак, средний уровень и интенсивность аномалий; степень изрезанности регистрируемых графиков; взаимное соотношение аномалий, конфигурацию их в плане. Поскольку редко удается лишь по одному геофизическому методу однозначно опознать ту или иную породу, обычно используется несколько методов. Задача облегчается тем, что в настоящее время щиты и горно-складчатые сооружения геофизически хорошо изучены (в основном гравимагнитными наблюдениями).

Для литологического картирования скального основания в наибольшей мере применяется магниторазведка обычно в комплексе с ЭП, которое сопровождается небольшим количеством пунктов ВЭЗ, необходимых для расширения графиков профилирования и некоторых других целей. В условиях Урала, Украинского кристаллического массива и некоторых других районов комплекс магниторазведки и ЭП дополняется гравиметрией. Использование последней вызвано недостаточной дифференцированностью пород по магнитным и электрическим свойствам. При отсутствии в разрезе магнитоактивных пород от магниторазведки приходится отказаться, заменяя ее грави-

метрии, а иногда и сейсморазведкой, особенно при значительной мощности покровных отложений. Но как гравиметрию, так и сейсморазведку редко используют лишь в целях геологического картирования, поскольку эти методы требуют больших затрат.

Картирование зон тектонических нарушений (разломов). Обычно производится одновременно с литологическим картированием скального основания, особенно на стадии поисков. При детальном работах это становится, однако, предметом специальных исследований. Зоны разломов могут быть обнаружены как путем изучения гипсометрии поверхности монолитных пород, так и на основе изучения особенностей геофизических аномалий, присущих этим зонам (при отсутствии смещения блоков).

Разломы, проявляющиеся в результате неотектонических движений («активные разломы»), отличающиеся значительными вертикальными смещениями блоков и легко фиксируемые геофизическими методами по изменению мощности молодых рыхлых отложений, представляют для гидрогеологии особый интерес: это обычно хорошо водовыводящие каналы. Роль древних необводненных разломов иногда противоположна: они могут служить в силу разного рода вторичных процессов гидрогеологическими экранами, препятствующими движению воды (зачастую водообильными остаются лишь участки, примыкающие к разломам, оперяющим основную зону дробления). Разломы первого типа при значительных амплитудах смещения блоков, соизмеримыми с мощностью рыхлых отложений, могут быть выявлены ВЭЗ, ЭП, в более сложных случаях — сейсморазведкой. При региональных исследованиях активные разломы можно обнаружить по имеющимся материалам многолетних сейсмологических наблюдений: вдоль них сосредотачиваются эпицентры землетрясений различной интенсивности.

Активные разломы иногда сопровождаются определенными изменениями физических свойств пород рыхлого покрова. Часто это отражается на величине электрического сопротивления, меняется также характер сейсмической записи и т. д.

В ряде случаев тектоническая активность разломов затухает во времени. В условиях слоистого разреза это проявляется в ослаблении интенсивности тектонических форм при движении вверх по разрезу. Например, в Московском артезианском бассейне многие разломы фиксируются по смещению блоков фундамента (на глубинах в несколько километров от земной поверхности). Выше по разрезу разломы отмечаются флексурами, еще выше — слабыми вытянутыми складками, а в верхней части разреза (в частности, в известняках S_3 — P_1) вообще не проявляются в виде дислокаций, однако именно над такими разломами карбонатные породы отличаются повышенной трещиноватостью и водообильностью. Таким образом, изучение на

значительной глубине разломов фундамента, особенно хорошо осуществляемое методами сейсморазведки, способствует выявлению трещиноватых (закарстованных) пород в верхней части разреза.

Во многих случаях разломы не могут быть выявлены по вертикальному смещению тектонических блоков, например, при значительной эрозии верхней части разреза коренных пород. Задача может быть решена при литологическом картировании скального основания (см. выше) на основе выявления горизонтальных смещений блоков либо путем специального анализа геофизических аномалий, обладающих, как известно, рядом характеристических признаков, свойственных разломной тектонике [12, 13, 20, 22, 30 и др].

Картирование зон повышенной трещиноватости. Трещиноватость скальных пород, служащая главным фактором, определяющим их водообильность, по генезису и морфологическим особенностям подразделяется на две основные категории: трещиноватость экзогенную, связанную главным образом с выветриванием пород, и трещиноватость эндогенную, обусловленную тектоническими процессами. Экзогенная трещиноватость хорошо коррелируется с рельефом местности, климатическими условиями, мощностью покрова, литологическим составом рыхлых и скальных пород и т. п. и охватывает на значительной территории приповерхностную часть скальных массивов мощностью в несколько десятков метров. Эндогенная трещиноватость, приуроченная к разного рода нарушениям и ослабленным зонам (образованным вследствие растягивающих напряжений, например, в замковых частях антиклинальных складок, вдоль флексур и т. п.), узко локализована по площади, но прослеживается на большую глубину, измеряемую сотнями метров. Поскольку изучение разломной тектоники и зон повышенной трещиноватости проводится одновременно с использованием идентичных методических приемов, целесообразно рассмотреть указанные исследования совместно, выделив при этом частные задачи: определение мощности (в плане) зон эндогенной трещиноватости и угла их падения; оконтуривание по площади участков пород интенсивной трещиноватости; оценку мощности (в разрезе) трещиноватой зоны; примерную характеристику литологического состава пород зоны трещиноватости (коры выветривания); определение направления доминирующей системы трещиноватости пород; характеристику литологического состава заполнителей трещин (кольматаж) и др.

Анализ физических свойств пород говорит о возможности применения всех геофизических методов для оконтуривания зон повышенной трещиноватости, в том числе и зон разломов. Наиболее универсальными из них, отличающимися повышенной глубиной и меньшей зависимостью от влияния рыхлого покрова и состава скального основания, являются электрораза-

ведка постоянным током, сейсморазведка и отчасти магниторазведка. Менее эффективны различные модификации высокочастотного профилирования, гравиметрия, радиометрия — результаты исследования зависят от увеличения мощности рыхлого покрова.

Обычно при оконтуривании зон повышенной трещиноватости используется примерно тот же комплекс, что и при литологическом картировании.

Вертикальную мощность трещиноватых пород можно определить по данным ВЭЗ, КМПВ, иногда гравиметрии. Наиболее просто и надежно задача решается, когда мощность рыхлых отложений незначительна. Заметное снижение электрического сопротивления, скорости упругих волн и плотности трещиноватых пород способствует эффективности этих методов. Часто, однако, при оценке мощности трещиноватых пород исследователи сталкиваются с серьезными затруднениями, наиболее важные из которых — отсутствие существенной границы в физических параметрах рыхлых и трещиноватых пород¹ и градиентные изменения этих параметров в трещиноватой зоне.

При использовании ВЭЗ зачастую не удается отделить рыхлые (особенно грубообломочные) породы от трещиноватых, а последние от массивных. Некоторые полуколичественные оценки можно получить, применяя КВЭЗ и находя зависимость λ_k ($AB/2$) [22]: повышенная анизотропность трещиноватых пород позволяет выделить в разрезе их кровлю и подошву. При сравнительно однородных условиях и наличии градиентного нарастания электрического сопротивления трещиноватой зоны с глубиной можно также использовать метод нормированных сопротивлений. Наименее благоприятен случай, когда низкоомные мощные глинистые образования залегают на скальном основании.

Сейсморазведка в меньшей мере подвержена отмеченным выше затруднениям. При градиентном нарастании скоростей с глубиной образуются рефрагированные волны, приближенная оценка мощности трещиноватых пород по которым вполне возможна [8].

При изучении трещиноватости, связанной с зонами разломов, возникает необходимость оценить мощность трещиноватой зоны (в плане) и угол падения или направление падения этой зоны. Задачи решаются при детальном профилировании с помощью электро-, магнито- и гравиразведки. Наиболее универсальным методом является двухгоризонтное ЭП с большими разносами, причем часто применяется комбинированное ЭП, отличающееся высокой разрешающей способностью. Еще боль-

¹ Привлечение геологических материалов, по которым может быть определена мощность рыхлых отложений, позволяет, однако, легко оценить мощность трещиноватых пород.

шим эффектом характеризуется методика непрерывного электрического зондирования, использованная учеными МГУ при работах на трассе БАМа (А. А. Либерман и др., 1979 г.), позволяющая строить с высокой степенью детальности вертикальные разрезы ρ_k . Как показала практика рудной геофизики, при изучении крутопадающих глубоких зон разломов в горноскладчатых областях можно использовать отраженные и рефрагированные волны [12]. Видимо, такие исследования целесообразно проводить при гидрологических работах.

Для определения направления генеральной системы трещиноватости изучается физическая анизотропность пород в их естественном залегании: с помощью наблюдений по профилям, имеющим различные направления, исследуются электрическое сопротивление пород [22], скорость продольных и поперечных волн [8], поляризуемость [43]; иногда проводятся микромагнитные наблюдения [32]. Все эти методы дают хорошие результаты, если слоистость пород совпадает с направлением трещиноватости. В противном случае можно получить фиктивные результаты. При электроразведке (КВЭЗ, КВЭЗ-ВП) особенно необходима однородность условий в верхней части разреза, сложенной рыхлыми образованиями. Наличие разного рода локальных инородных включений может совершенно исказить результаты (А. С. Семенов, 1975 г.).

При детальных исследованиях часто требуется не только выявить области трещиноватости и определить основные геометрические параметры (мощность, простирание и т. п.), но в какой-то мере охарактеризовать степень дезинтеграции пород, а также оценить заполнение трещин привнесенным материалом. На эти вопросы может дать ответ электро-, сейсмо- и магниторазведка. В наибольшей мере используются данные электроразведки. Если трещины заполнены водой, можно утверждать (при постоянстве минерализации подземных вод и стабильности других факторов), что чем ниже удельное электрическое сопротивление пород $\rho_{п}$, тем значительнее их трещиноватость. Отсюда следует, что по величине относительного сопротивления $P = \rho_{п}/\rho_0$ (где ρ_0 — сопротивление подземных вод) можно в какой-то мере охарактеризовать интенсивность трещиноватости пород. При постановке ВЭЗ на трещиноватых водообильных породах зачастую фиксируются кривые типа Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), в которых сопротивление ρ_2 и мощность h_2 характеризуют трещиноватую зону. Чем больше величина $S_2 = h_2/\rho_2$, легко определяемая по кривой ВЭЗ (более надежно, чем отдельно параметры ρ_2 или h_2), тем значительнее водообильность толщи трещиноватых пород. Однако такая закономерность справедлива до определенного предела, так как при значительной дезинтеграции пород за счет образования мелкообломочного материала резко ухудшаются фильтрационные свойства зоны трещиноватости, одновременно убывает сопротивление ρ_2 и увеличивается про-

водимость S_2 . Например, для ряда районов Украинского кристаллического щита доказано, что сопротивление массивных пород в 1000—2000 Ом·м и более характеризуют их весьма слабую трещиноватость, от 1000 до 100 Ом·м — повышенную, в интервале 100—300 Ом·м — максимальную; сопротивление же менее 100 Ом·м характерно для каолинизированных пород, водообильность которых совершенно незначительна [30].

Заполнение трещин тонкообломочным, особенно глинистым, материалом делает интерпретацию кривых ВЭЗ совершенно неоднозначной, так как не известно, с чем связано изменение сопротивления пород: с увеличением трещиноватости или заполнением трещин глинистым материалом. Существенную помощь в такой ситуации могут оказать совместные определения анизотропности пород по величине электрического сопротивления ρ_k и поляризуемости η_k . Как показали исследования Н. Н. Шарпанова и др. [43], по методу ВП в модификации кругового зондирования, в случае заполнения трещин карбонатных пород глинистым материалом, фиксируется отчетливый эллипс анизотропии по параметру η_k , причем ориентировка его большой оси перпендикулярна направлению генеральной трещиноватости. При отсутствии глинистости эллипс анизотропии по параметру η_k не фиксируется, в то время как по параметру ρ_k четко наблюдается.

По сейсмическим данным об интенсивности трещиноватости пород и о литологическом составе заполнителя трещин можно судить, используя продольные и поперечные волны. Действительно, зная величину скорости продольных волн v_p в скальных массивах и трещиноватых породах (в которых трещины заполнены воздухом или водой), можно оценить коэффициент трещиноватости $k_{тр}$, характеризующий отношение объема трещин к общему объему массива (А. И. Савич и др., 1969 г.). По соотношению скоростей поперечных и продольных волн v_s/v_p можно приближенно судить о составе заполнителя трещин: минимальные значения v_s/v_p характерны для трещиноватости, заполненной водой, максимальные — песком, промежуточные — глинами [8].

Определение уровня, направления и скорости движения трещинно-грунтовых вод, выявление мест их питания и разгрузки. Решение перечисленных задач существенным образом помогает при характеристике водообильности трещиноватых пород. Действительно, четко прослеживаемая граница, связываемая с зеркалом трещинно-грунтовых вод, свидетельствует о высокой степени трещиноватости пород (в противном случае зеркало вообще не образуется). При слабой трещиноватости пород УГВ испытывает резкое погружение в сторону водоемов, где идет разгрузка подземных вод; при значительной трещиноватости УГВ слабо зависит от рельефа местности, отличаясь пологом уклоном. Увеличенная скорость подземных вод также свиде-

тельствует о сильной трещиноватости и больших значениях проницаемости изучаемых пород. Выявление обширных областей питания как на водоразделах, так и в долинах рек, служит косвенным показателем увеличенной трещиноватости коренных пород.

Определение глубины до зеркала трещинно-грунтовых вод производится с помощью метода ВЭЗ. Этому способствует весьма высокое сопротивление пород зоны аэрации и сравнительно низкое сопротивление ρ водонасыщенных пород. На границе, отделяющей сухие породы от водонасыщенных, отмечается скачок сопротивлений, причем [22] изменение ρ может быть десятикратным, иногда более высоким. Наиболее четко УГВ фиксируется в карбонатных и лавовых породах. Попытки использовать сейсморазведку для изучения УГВ в трещиноватых породах оказались безуспешными. Однако для полускальных пород, например песчаников, когда наряду с циркуляцией подземных вод по трещинам имеет место движение по порам, с помощью МПВ удастся решить задачу [8].

Определение направления и скорости подземного потока наиболее эффективно осуществляется при окологважинных наблюдениях по методу заряженного тела (МЗТ). Наилучшие результаты зафиксированы при изучении скальных трещиноватых, закарстованных пород [14]. МЗТ можно сочетать с методом ЕП, когда наблюдения ведутся до начала и во время откачки скважин. При этом изолинии равных электрических потенциалов, наблюдаемые с помощью обоих методов, образуют вытянутые фигуры вдоль подземного потока. В особо благоприятных условиях МЗТ и ЕП можно использовать и без скважин (при неглубоко залегающих трещиноватых обводненных породах, местами выходящих на земную поверхность), когда можно ввести электролит в трещиноватую зону непосредственно с поверхности.

При выявлении областей питания и разгрузки большое значение имеют и косвенные и прямые наблюдения. Первые проводятся на начальном этапе исследований и заключаются в оконтуривании участков, которые потенциально могут быть гидрогеологическими «окнами» (это зоны малой мощности и хорошей водопроницаемости рыхлых пород, участки разломов и повышенной трещиноватости скальных пород и т. п.). Особенно важны исследования в зоне водоемов, рек, озер, прибрежной части морей. Например, с помощью электропрофилеирования и ВЭЗ можно легко обнаружить в живом русле реки участки, где мощность аллювиальных отложений, залегающих на скальном основании, сокращается, а глинистый материал замещается песчано-гравийно-галечниковым; здесь вполне возможна область перетока речных вод в подземные [14, 22].

Приемы прямых исследований заключаются в непосредственном наблюдении процессов фильтрации и связанных с ними

геофизических аномалий. Сюда следует отнести изучение естественных и вызванных электрических потенциалов, температуры и электрического сопротивления породы и воды [4, 23 и др.]. Перечисленные методы ценны тем, что позволяют не только зафиксировать движение подземных вод, но и способствуют количественным оценкам этого явления в пространстве и путем повторных наблюдений — во времени.

Использование метода ЕП для изучения движения подземных вод хорошо известно применительно к рыхлым породам. Менее изучено возникновение ЕП при исследовании трещиноватых пород. Потенциалы, образующиеся при фильтрации воды сквозь трещиноватые породы, значительно меньше, чем при фильтрации сквозь песчаные. Песчаный заполнитель трещин может увеличить эффект, глинистый, напротив, резко уменьшить и даже изменить знак ЕП (В. А. Богословский, 1974 г.). Наиболее удобно использовать метод ЕП, когда трещиноватые породы перекрыты маломощным слоем хорошо фильтрующих песков. В целом, однако, исследования методом ЕП дают неустойчивые результаты.

Резистивиметрия и термометрия в полевом варианте давно уже завоевали признание при выявлении мест разгрузки подземных вод, отличающихся аномальными минерализацией и температурой. Особенно широко эти методы используются при выявлении зон разломов, по которым разгружается вода, на участках их пересечения с реками, ручьями, озерами и т. п. [23].

Все перечисленные «прямые» методы применяются, как правило, на этапе детальных исследований, когда уже локализованы возможные места питания и разгрузки подземных вод. Особенно они эффективны в субкавальных условиях, где в меньшей мере сказываются разного рода помехи.

Оценки минерализации подземных вод. Наиболее просты косвенные решения, основанные на структурно-геологических построениях, описанных выше. Установлено, что глубокое погружение трещиноватых пород под покровом слабопроницаемых рыхлых отложений способствует повышению минерализации трещинных вод [30, 31]. Об изменении минерализации трещинных вод можно также судить по форме зеркала грунтовых вод. Например, на Устюрте локальные поднятия УГВ в сарматских известняках, установленные по геофизическим данным, совпадают с областями распространения в них пресных вод (здесь происходит инфильтрация поверхностных вод в трещиноватые породы) [13].

Приближенная (обычно сравнительная) оценка минерализации подземных вод в трещинных массивах основана на изучении удельного электрического сопротивления ρ этих образований (см. рис. 10). Увеличение минерализации подземных вод способствует снижению ρ пород. Например, при изучении методом ВЭЗ одного из месторождений в Карпатах удалось проследить

на глубине границу, отделяющую известняки с пресной водой от тех же пород — с минерализованной [16]. Однако увеличение трещиноватости и глинизации массивных пород сопровождается снижением сопротивления. В силу этого по величине сопротивления (с учетом всей совокупности геолого-гидрогеологических данных) дается обычно качественная оценка минерализации подземных вод, причем такое решение возможно лишь при резком и значительном изменении минерализации. Лишь в отдельных особо благоприятных случаях, когда на величину ρ влияет только минерализация подземных вод, удается дать полуколичественную ее оценку.

Оценка водообильности трещиноватых пород. Изучение трещиноватости скальных пород представляет собой сложную, трудоемкую задачу. Лишь с той или иной степенью вероятности комплексам геофизических данных (впрочем, как и по результатам других методов исследований) можно определить в конечном счете водообильность трещиноватых пород. В качестве удачных примеров такого комплексного подхода можно назвать работы, проведенные на Украинском щите [30] и в Московском артезианском бассейне [17]. В практике геологоразведочных работ, однако, широко поставленный многофакторный анализ используется редко. Привлекаются один-два, редко три признака, устанавливаемые чаще всего по данным геоэлектрических исследований. Такой подход дает положительные результаты лишь при достаточно однородных условиях на локальных участках. Так, например, отмечена возможность обнаружения прямой связи при изучении карбонатных пород между электрической проводимостью и коэффициентом фильтрации пород [13, 14, 32]. В других случаях установлена трехмерная связь между коэффициентом фильтрации, с одной стороны, и относительным сопротивлением пород R и коэффициентом их кажущейся анизотропии λ_k либо сопротивлением и граничной скоростью v_r , с другой стороны. В большинстве же случаев необходимо привлекать значительно больший набор характеристик, оцениваемых по геофизическим, геологическим и ландшафтным наблюдениям.

4.2. ТРЕЩИННО-ЖИЛЬНЫЕ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В ИЗВЕРЖЕННЫХ И МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

Полевые геофизические методы давно применяются при поисках и разведке трещинных и трещинно-жильных вод. Известны многочисленные примеры этих работ при исследовании Украинского кристаллического щита (УКЩ), Балтийского щита, Центрального Казахстана. Накоплен опыт по Уралу, Алтаю, Саянам, западным отрогам Тянь-Шаня, Малому Кавказу, Дальнему Востоку. В наибольшей мере методика геофизических поисково-разведочных исследований разработана на объектах Украины, особенно благодаря многолетним целеустремленным

наблюдениям, приведенным под руководством С. А. Шмарьяна и М. Н. Байсаровича. Их разработки, выполненные на высоком уровне и давшие ценные практические результаты, положены в основу предлагаемой ниже методики.

При поисково-разведочных работах на трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды перед геофизическими методами ставятся задачи, сформулированные в разделе 4.1. На методику и эффективность геофизических исследований в значительной степени влияют природные условия: мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих трещиноватые породы; состав и условия залегания коренных пород, характер их трещиноватости (протяженность трещиноватых зон, их ширина и вертикальная мощность и т. п.); климатическая зональность изучаемого участка; рельеф местности.

Особенно значительно влияние на методику строения рыхлого покрова, который можно условно разделить на два типа: а) незначительная мощность рыхлого покрова (до 10—20 м), б) значительная мощность покрова (до 50—100 м). При незначительной мощности покрова можно использовать большинство геофизических методов. Особенно эффективными при этом являются приемы разного рода профилирования (электрическое, магнитное и т. п.). При значительной мощности покрова методы естественной радиоактивности и ЕП становятся неэффективными. Основными методами исследований становятся ВЭЗ, сейсмо- и магниторазведка.

Влияние состава и тектоники скального основания также сказывается на выборе методов. Так, наличие резко дифференцированных по плотности структурно-формационных зон, отличающихся различной водообильностью, делает желательным привлечение гравиметрических методов, особенно на стадии предварительных поисков. Наличие магнитоактивных пород определяет использование магниторазведки (а при слабой магнитности пород — микромагнитной съемки). При более или менее однородном составе скального основания методика геофизических исследований упрощается. Так, например, поиск трещинно-жильных вод на территории Балтийского щита является более простой задачей, чем поиск в условиях Центрального Казахстана.

Наличие климатической зональности оказывает существенное влияние на гидрогеологические условия, особенно отражается на первом водоносном горизонте и соответствующим образом на характере физических полей. В засушливых областях, например, необходимо изучить геофизическими методами степень минерализации грунтовых вод рыхлого покрова. Как правило, если последние отличаются повышенной минерализацией, то и в трещинных породах водообильность низка, а минерализация увеличена.

Рельеф местности зачастую определяет применимость раз-

личных геофизических методов, систему наблюдений и выбор установок. В условиях сложного рельефа результаты некоторых геофизических методов становятся неоднозначными; при этом от сплошной съемки приходится отказаться, переходя на профильно-площадную или только профильную систему наблюдений; иногда необходимо менять тип установки, например, используя при ВЭЗ трехэлектродную схему вместо симметричной четырехэлектродной и т. д.

Наиболее значительно методика геофизических наблюдений меняется в зависимости от стадии исследований (табл. 11).

Общие поисковые работы, нацеленные на оконтуривание участков детальных поисков, осуществляется на базе имеющихся материалов, либо путем специальных полевых работ. Они охватывают большие площади. Средний масштаб картирования ограничивает число решаемых задач. Сюда входят: определение примерного состава и мощности (совместно с корой выветривания) рыхлых отложений, оценка минерализации циркулирующих в них грунтовых вод, выявление гипсометрической поверхности ненарушенных пород кристаллического (или складчатого) основания, обобщенная оценка литолого-петрографического состава пород этого основания, прослеживание в нем основных структурно-формационных зон и крупных зон разломов. На основании этого дается районирование изучаемой территории по степени перспективности ее на трещинно-жильные воды. Для прогнозирования можно привлекать все геофизические методы, но наибольшее практическое значение имеют магнито-, грави- и особенно электроразведка (ВЭЗ).

В настоящее время геофизическая изученность щитов и горноскладчатых сооружений достаточно полная, как правило, обеспечивающая проведение на значительной территории предварительных поисков трещинно-жильных подземных вод. Об этом убедительно свидетельствует опыт работ по Украинскому кристаллическому щиту и Центральному Казахстану М. Н. Байсаровича и др. (1977), Ю. А. Осянина и др. (1978 г.). В тех случаях, когда электроразведка на исследуемой территории ранее выполнена в объеме, недостаточном для гидрогеологических целей, следует провести дополнительные полевые работы по методу ВЭЗ, прокладывая в нужных местах отдельные маршруты с тем, чтобы довести густоту наблюдений до 0,5—1,0 ф. т./км²; разности $AB=1\div 2$ км обычно обеспечивают решение задачи.

В качестве примера общих поисков, весьма удачно проведенных лишь на основе анализа фондовых материалов, укажем на исследования по Украинскому кристаллическому массиву, организованные трестом «Киевгеология» в середине 70-х годов [30]. Эти работы позволили оценить прогнозные ресурсы подземных вод большой территории. Ранее, без геофизических данных, эту задачу гидрогеологи разрешить не смогли.

Таблица 11

Методы исследования и показатели геофизических работ		Стадии работ		
		Поиски		Предварительная разведка
		общие	детальные	
Площадь исследований, км ²		(1000—10 000) <i>n</i>	20—400	5—10
Результативный масштаб съемок		1 : 200 000—1 : 100 000	1 : 500 000—1 : 25 000	1 : 10 000
ВЭЗ с $AB_{\max} = 1 \div 2$, иногда до 4 км	Сеть наблюдений, м	1000—2000 \times 500—1000	500 \times 200	(10—250) \times (50—100)
	Густота наблюдений, ф. т./км ²	0,5—2	10	40—100 и более
Электропрофилирование с AB от 100—300 до 500—1000 м	Сеть наблюдений, м	—	250 \times 50	(100—250) \times (20—50)
	Густота наблюдений, ф. т./км ²	—	80	
Магниторазведка	Масштаб	1 : 100 000—1 : 50 000	1 : 25 000	—
	Сеть наблюдений, м	500—1000 \times 50—100	250 \times 50	—
	Густота наблюдений, ф. т./км ²	10—40	80	—
Гравиразведка	Масштаб	1 : 100 000—1 : 50 000	Профильная съемка с шагом 50 м	—
Сейсморазведка КМПВ	Сеть наблюдений, м	—	Профильная съемка с шагом 10 м	(200—500) \times 10

Детальные поиски трещинно-жильных вод представляют собой наиболее сложный и ответственный этап геофизических работ, на котором приходится разрешить почти все задачи, сформулированные выше. Как показывает опыт работ на Урале, в Казахстане, на Украине и в других регионах, наиболее рационально вести исследования при детальных поисках в масштабе 1:50 000—1:25 000 (см. табл. 11). Исследуемые площади варьируют от нескольких десятков до нескольких сотен квадратных километров, в среднем составляя 50—100 км². В последние годы обнаруживается тенденция к росту изучаемой площади, что позволяет лучше выбрать перспективные участки. Кроме того, попутно выявляются водообильные участки как для крупного, так и для децентрализованного водоснабжения, что способствует улучшению экономических показателей работ. Глубина исследований обычно составляет не более 50—100 м. Применение при зондированиях увеличенных разносов AB_{\max} (иногда до 4 км) связано с необходимостью сравнительной оценки величины сопротивления ρ глубоководных пород.

При детальных поисках используется широкий комплекс геофизических методов: ВЭЗ, ЭП, КВЭЗ, МПВ (КМПВ), магнито- и гравиразведка. Однако роль и объемы перечисленных методов неравноценны. Целесообразно поисковые работы выполнять в две стадии. На первой осуществляется равномерное освещение всей площади с помощью наиболее мобильных геофизических методов — ВЭЗ, ЭП и магниторазведки.

Вопрос о соотношении методов ВЭЗ и ЭП достаточно сложен. Если в начале 70-х годов ЭП зачастую использовалось как ведущий метод, а ВЭЗ как вспомогательный (в основном для расшифровки графиков ЭП на аномальных участках), то в настоящее время удельный вес ВЭЗ явно возрастает. Лишь на участках с четко выдержанными простиранями структур (например, Урал) ведущее место сохраняется за ЭП. Кривые ВЭЗ при достаточно густом шаге наблюдений вдоль профиля обладают несравненно большей информативностью, чем графики ρ_k ЭП. Тип кривых ВЭЗ, удельное электрическое сопротивление горизонтов, их мощность и ряд других показателей — все это дает возможность не только выделить минимумы ρ_k , но и сделать заключение о характере трещиноватости и водообильности коренных пород. Однако экономические соображения, естественно, заставляют какой-то объем ВЭЗ заменять ЭП. Вопрос этот в каждом конкретном районе должен получить свое решение.

На второй стадии осуществляется детализация выделенных перспективных участков. Основная роль при этом принадлежит ВЭЗ по более детальной сети и сейсморазведке МПВ по редким профилям. Дополнительно используются по отдельным профилям ЭП, гравиразведка и в отдельных пунктах КВЭЗ.

Основная задача всех методов — выделение водообильных трещиноватых зон. Наиболее результативным является сочетание ВЭЗ с сейсморазведкой. Применение гравиметрии вдоль отдельных профилей снижает неоднозначность интерпретации данных электроразведки, но при возможности использования сейсморазведки применение гравиметрии становится излишним.

Как показывают расчеты, выполненные по данным геофизических исследований на Украинском щите, на 1 км² исследованной площади при детальных поисках в среднем необходимо отработать на обоих этапах наблюдений (в дополнение к ранее выполненным исследованиям) следующие объемы геофизических работ (табл. 12). Протяженность профилей ЭП при поисках в среднем в 1,5—3 раза больше протяженности профилей ВЭЗ. Сокращение в последние годы объема ЭП идет одновременно с заменой сложных схем ЭП (комбинированного, дипольного и др.) более простыми (в частности, симметричным). Хотя информативность последнего несколько меньше, однако и затраты значительно сокращены. По-видимому, в таких районах, как Украинский щит, Центральный Казахстан и некоторые другие, метод ВЭЗ в ближайшее время в значительной мере заменит ЭП.

Применение геофизических методов при предварительной, а тем более детальной разведке осуществляется довольно редко. Обычно на этих стадиях используется лишь каротаж скважин. Однако в результате работ последних лет на Украинском кристаллическом щите (М. Н. Байсарович, С. А. Шмарьян, 1976—1978 гг.) доказана высокая эффективность геофизических работ при предварительной разведке. Имеются также, правда, немногочисленные примеры удачных работ и при детальной разведке. Основной задачей геофизических работ при предварительной разведке является детальное изучение выявленных при поисках зон трещиноватости. По этим данным должны быть заложены разведочные гидрогеологические скважины. Попутно решаются и другие вопросы, в частности выясняется гидравлическая связь поверхностных и подземных вод и т. п.

Таблица 12

Метод	Средний шаг наблюдений вдоль профиля, м	Густота сети наблюдений, км/км ²	
		Детальные поиски	Предварительная разведка
ВЭЗ	100—200	1—2	5—10
ЭП	50	3	—
Магниторазведка	50	4	—
Гравиразведка	50	0,7	—
Сейсморазведка	10	0,2	2—5

Как показывает опыт по Украине (его можно с небольшими коррективами распространить на другие регионы, где изучаются трещинно-жильные воды), при предварительной разведке полевые геофизические исследования ведутся в масштабе 1 : 10 000 (реже 1 : 25 000 или 1 : 5000). Изучаются небольшие участки площадью в 5—10 км². Основными методами исследований служат сейсморазведка МПВ (КМПВ) и ВЭЗ. При сравнительно простых условиях обрабатывается серия профилей, перпендикулярных простиранию основных зон разломов и трещиноватости, причем сеть профилей ВЭЗ по меньшей мере вдвое гуще, чем сеть профилей сейсморазведки. В более сложных условиях, когда нет четкой ориентировки водообильных зон, используется система ортогональных профилей. Особенностью разведочных работ является чрезвычайно густая сеть наблюдений методом ВЭЗ, когда расстояние вдоль профилей между пунктами сокращается до 100 и даже 50 м. В такой ситуации в целях сокращения расходов можно рекомендовать методику сплошного электрического зондирования (СЭЗ).

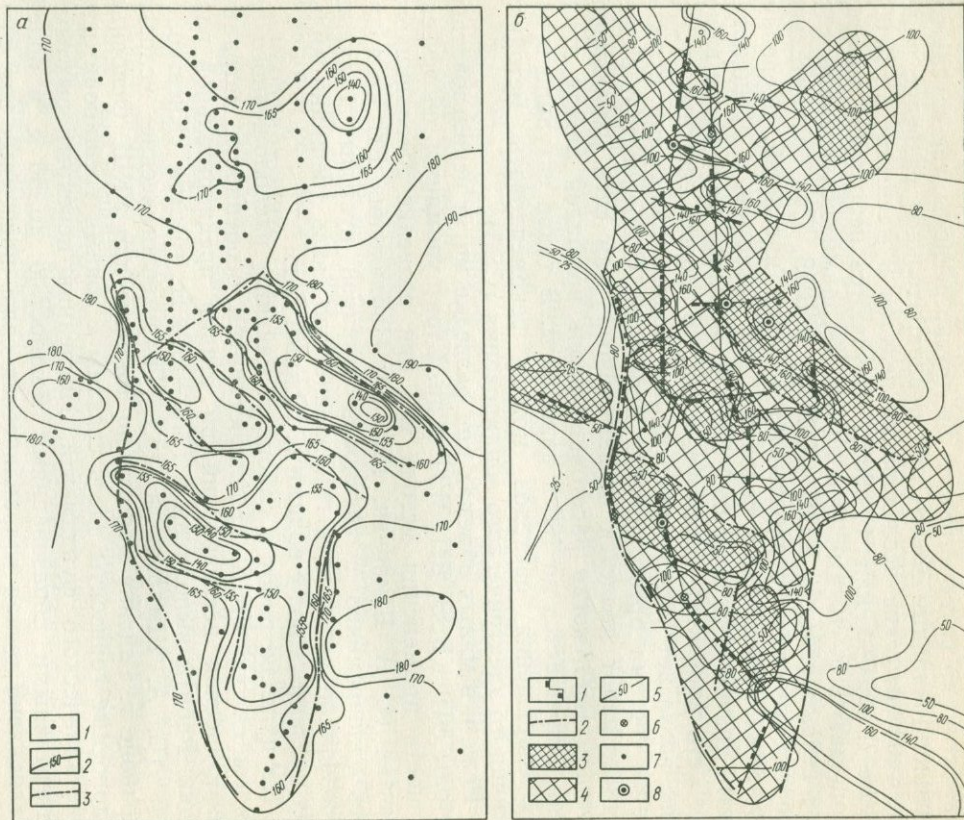
Реже и в малых объемах при разведке могут использоваться методы ЭП, КВЭЗ, ЕП, МЗТ и др. Стоит упомянуть об эффективности применения метода ЕП при разведке Хмельницкого участка (С. А. Шмарьян, 1976 г.). Наблюдения ЕП проводились одновременно с групповой откачкой кустовых скважин и позволили установить гидравлическую связь трещинно-жильных подземных вод с водами р. Южный Буг.

На примере работ в районе р. Гайсина, расположенного на южном склоне УКЩ, проиллюстрируем особенности методики геофизических исследований на стадии предварительной разведки. Работы выполнены в 1973—1974 гг. трестом «Киевгеология» (С. А. Шмарьян и др.). Гидрогеологические условия в районе г. Гайсина достаточно типичны для УКЩ. Основные водоносные горизонты здесь связаны с зонами трещиноватости кристаллического фундамента. Последний перекрыт рыхлыми четвертичными образованиями мощностью до 50 м и более. Установлена тесная гидравлическая связь подземных вод фундамента с подземными водами четвертичных образований и поверхностными водами протекающей поблизости р. Соб. Минерализация подземных вод не превышает 0,4 г/л. В 1971—1972 гг. в районе проведены поисковые работы (с применением геофизических методов) и выделен перспективный участок «Северный» площадью около 10 км², где и были осуществлены описываемые ниже разведочные работы (рис. 14).

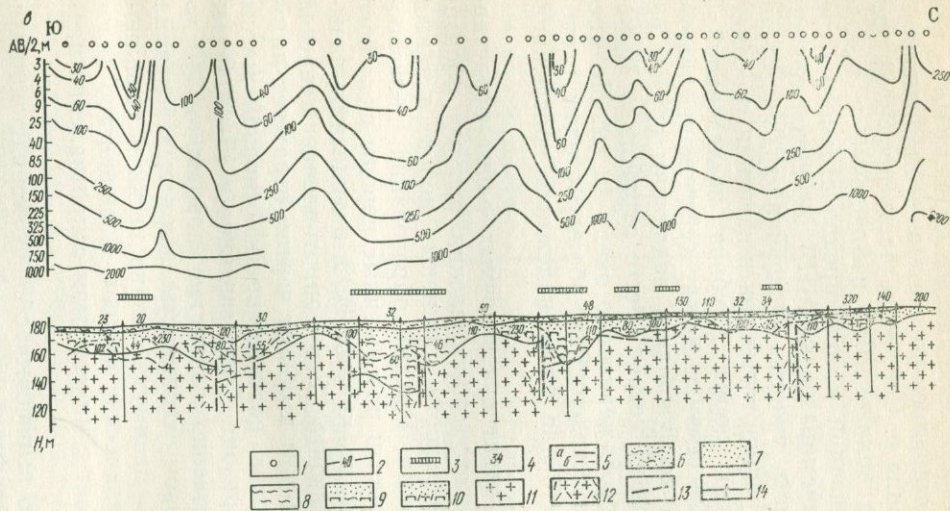
Основная задача геофизических работ на этом участке заключалась в детальном изучении известных и обнаружении новых зон трещиноватости с трещинно-жильными водами. Применены два метода — ВЭЗ и сейсморазведка МПВ. Задача ВЭЗ заключалась в выявлении и прослеживании предполагаемых нарушений и трещиноватых зон кристаллического фундамента и

Рис. 14. Результаты геофизических работ по Северному участку около г. Гайсин (по данным С. А. Шмарьяна и др., 1974 г.).

а — карта изогипс поверхности монокристаллических пород; 1 — точки ВЭЗ; 2 — изогипсы поверхности монокристаллических пород, м; 3 — тектонические нарушения, выявленные по геофизическим данным; *б* — карта элементов рельефа поверхности монокристаллических пород и электрического сопротивления надпорного горизонта: 1 — трещиноватые зоны кристаллических пород по данным сейсморазведки; 2 — тектонические нарушения по данным ВЭЗ; 3 — депрессия поверхности монокристаллических пород; 4 — более глубокие локальные погружения поверхности монокристаллических пород фундамента; 5 — линии равных электрических сопротивлений надпорной толщи, Ом·м; гидрогеологические скважины; 6 — низкодебитные и безводные (дебиты менее 1 л/с), 7 — водообильные (дебиты от 1 до 10 л/с), 8 — наиболее водообильные (дебиты более 10 л/с); *в* — вертикальный разрез ρ_K и геоэлектрический разрез по сводному меридиональному профилю: 1 — точки ВЭЗ вдоль профиля; 2 — изоомы на вертикальных разрезах ρ_K , Ом·м; 3 —



тела с повышенной электрической проводимостью; 4 — электрическое сопротивление горизонта, Ом·м; 5 — границы: а — между электрическими горизонтами, б — между сейсмогеологическими горизонтами (преломляющая граница по данным КМПВ); верхние геоэлектрические горизонты: 6 — сопротивление от 10 до 50 Ом·м, преимущественно суглинки и супеси, 7 — сопротивление более 50 Ом·м, пески; надопорный геоэлектрический горизонт: 8 — породы с сопротивлением до 15 Ом·м (глинистые породы), 9 — породы с сопротивлением 40–70 Ом·м (нерасчлененная толща, объединяющая пески и каолиновую кору выветривания), 10 — породы с сопротивлением от 70 до 300 Ом·м (нерасчлененная толща); 11 — опорный горизонт высокого сопротивления (монолитные кристаллические породы); 12 — трещиноватые кристаллические породы; 13 — зоны некоррелируемости и вертикальных смещений электрических горизонтов, предполагаемые тектонические нарушения; 14 — гидрогеологическая скважина



изучении рельефа поверхности монолитных пород. ВЭЗ с раз- носами AB_{\max} до 1,0 км ставились по системе субмеридиональ- ных профилей вдоль долины р. Соб, лишь часть профилей про- ложена перпендикулярно долине. Шаг наблюдений в методе ВЭЗ — 200 м, при детализации в зоне предполагаемого бурения скважин — 100 м. Сейсморазведка МПВ сконцентрирована на наиболее перспективном участке. Основная задача ее за- ключалась в выявлении трещиноватых зон и изучении гипсомет- рии поверхности коренных пород. Глубина исследований — первые десятки метров. Расстояние между сейсмоприемниками 10 м. Упругие колебания возбуждались падающим грузом ве- сом до 1 т с высоты четырех метров. Всего отработано 16 ко- ротких профилей общей протяженностью около 12 км. По мне- нию исполнителей, сеть наблюдений по обоим методам следо- вало бы несколько сгустить для более надежного прослежива- ния зон трещиноватости.

Основные результаты электроразведочных работ представ- лены картами электрического сопротивления рыхлых образо- ваний и гипсометрии поверхности массивных пород, а также геоэлектрическими разрезами. Рыхлые образования, включаю- щие четвертичные отложения и разрушенные породы скального основания, зафиксированы на кривых ВЭЗ в виде так назы- ваемого надпорного горизонта. Его сопротивление меняется от 15—20 до 200—300 Ом·м и в общих чертах отражает лито- логический состав и степень разрушенности основной массы пород, слагающих этот горизонт. Сопротивление в 15—20 Ом·м характеризует преимущественно глинистые породы, от 40 до 80 Ом·м — главным образом каолиновую кору выветривания и пески, более 80 Ом·м — преимущественно пески и трещино- ватые выветрелые кристаллические породы. Большинство водо- обильных скважин совпадает с максимумом сопротивления над- порного горизонта.

На карте изогипс четко вырисовывается субмеридиональная депрессия в монолитных породах, к которой приурочено место- рождение подземных вод: все водообильные скважины распо- ложены в пределах депрессии. Основная депрессия и локальные впадины внутри ее ограничены на карте линейными зонами больших градиентов глубин. Они, как правило, отвечают значи- тельным тектоническим нарушениям в виде вертикальных сме- щений блоков кристаллического фундамента. Это также хорошо иллюстрируется на геоэлектрических разрезах и вертикальных разрезах кажущихся сопротивлений ρ_K .

С помощью сейсморазведки по величине граничной скорости и некоторым дополнительным динамическим признакам наибо- лее надежно выявлены зоны трещиноватости. По совместным данным электро- и сейсморазведки установлена также мощ- ность трещиноватых пород.

Таблица 13

Характеристики, для которых рассчитан показатель « <i>b</i> »	<i>b</i> , %	Примечание
Минимальные значения граничной скорости v_r (4,0—4,6 км/с)	27,2	При увеличении v_r значение « <i>b</i> » резко уменьшается; при $v_r=3,2$ км/с « <i>b</i> »=0, т. е. водообильные скважины отсутствуют
Неглубокое залегание преломляющих границ (до 10—20 м)	34,0	При увеличении глубины преломляющей границы « <i>b</i> » убывает (водообильность уменьшается)
Небольшая ширина (до 40 м) зон с пониженным значением v_r	19,0	Широкие зоны с пониженными граничными скоростями v_r отличаются невысоким значением « <i>b</i> »
Приуроченность к тектонической депрессии	44,2	Все водообильные скважины участка приурочены к тектонической депрессии
Краевая часть депрессии, сочетающаяся с тектоническим нарушением	26,2	Наиболее водообильные скважины концентрируются в краевых частях депрессии
Сопrotивление надпорного горизонта более 125 Ом·м	34,0	При малых сопротивлениях ρ водообильность скважин резко падает

Интересны приемы авторов при оценке водообильности пород в зависимости от тех или иных геофизических показателей. На основе более ранних методических разработок (С. А. Шмарьян, 1972 г.) сделан подсчет так называемого параметра «*b*» (%), который приближенно указывает на возможную водоносность рассматриваемых аномалий (или выявленных по геофизическим данным структур):

$$b = k \frac{m}{m+n}.$$

Здесь m — общее количество водоносных скважин, пробуренных в контуре аномалий изучаемого типа; n — число низкодебитных и безводных скважин в этих же контурах; k — коэффициент, учитывающий представительность данного типа аномалий и определяемый как отношение количества водоносных скважин на аномалиях данного типа к количеству всех водоносных скважин участка. В табл. 13 приведены значения параметра b различных геофизических показателей, характеризующих благоприятные условия для обнаружения водообильных трещиноватых пород.

4.3. ТРЕЩИННЫЕ ВОДЫ БАЗАЛЬТОВЫХ ПОКРОВОВ

Кайнотипные лавы базальтового и андезитового состава отличаются значительной трещиноватостью и кавернозностью, благодаря чему в них концентрируются большие запасы подземных вод. Можно выделить две основные разновидности

месторождений подземных вод, связанные с лавовыми образованиями. Одна из них приурочена к вулканогенным супербассейнам, отличающимся значительной мощностью лавовых образований. В таких гидрогеологических структурах наиболее часто фиксируются крупные месторождения подземных вод. Другая разновидность, имеющая значительно меньшее практическое значение, связана со сравнительно маломощными лавовыми покровами, приуроченными к межгорным впадинам.

Рассмотрим месторождения, которые формируются в мощных толщах вулканических пород. Они широко распространены в области проявления молодого альпийского вулканизма — на Малом Кавказе, в Приморье, на Камчатке и обычно приурочены к положительным формам рельефа. Толща базальтов не сплошная: она состоит из серии покровов, разделенных корами выветривания. Трещиноватость базальтов наибольшая в кровле покрова, здесь же и максимальная водообильность. Все водоносные горизонты покрова гидравлически связаны между собой. Базальты снизу, как правило, подстилаются глинистыми образованиями (N—P), являющимися водоупорными. Сверху базальты также перекрыты песчано-глинистыми породами Q, мощность их обычно незначительная. Максимальная мощность обводненных пород (до 100 м и более) наблюдается в долинах рек. Здесь же установлена наибольшая водообильность, особенно в зонах разломов. В условиях горного рельефа подземные воды в базальтовых покровах образуют сосредоточенные водотоки шириной в несколько десятков метров, которые могут проходить как между отдельными лавовыми покровами, так и в основании всей эффузивной толщи.

Основной опыт геофизических исследований подземных вод в лавовых покровах накоплен в Армении [20—22]. Геофизические методы используются здесь, как правило, лишь на стадии детальных поисков. Изучение материалов показывает, однако, что их можно применять также при общих поисках и предварительной разведке.

На стадии общих поисков, когда изучаются большие площади (табл. 14), с помощью геофизических исследований могут уточняться основные структурные формы, в частности проследиваться крупные зоны тектонических нарушений, и изучаться гипсометрическая поверхность подошвы лавовых образований (на основе оценки их мощности). Задачи общих поисков могут решаться на основе использования имеющихся материалов, в первую очередь результатов геофизических работ при среднемасштабной гидрогеологической съемке. К числу наиболее важных данных следует отнести наблюдения методом ВЭЗ, КМПВ и гравимагнитные съемки масштаба 1 : 200 000—1 : 100 000. С помощью ВЭЗ и КМПВ оценивается мощность лавовых образований; грави- и магниторазведка позволяют решить осталь-

Таблица 14

Методы исследования и показатели геофизических работ		Средние данные		
		Общие поиски	Детальные поиски	Предварительная разведка
Результативный масштаб		1 : 200 000—1 : 100 000	1 : 50 000 изредка 1 : 25 000	1 : 25 000— 1 : 10 000
Площадь исследований, км ²		1000 и более	В среднем 500—500	10—20
Глубина разведки, м		400—600 и более	300—400	200—300
Методы полевых исследований		По имеющимся материалам: ВЭЗ и др.	ВЭЗ, ЭП, в опытно- порядке магниторазведка	ВЭЗ, ЭП, МПВ, КВЭЗ, МЗТ
ВЭЗ	Разносы AB_{\max} , км	4—6, отдельные пункты до 8—10	4—6	2—3
	Сеть наблюдений, км	5×2	2×1	(1—0,5)× ×(0,5—0,2)
	Густота сети наблюдений, ф. т./км ²	0,1	0,5	2—10
ЭП	Разносы AB и $A'B'$ в схеме $AA'MNB'B$, м	—	1000 и 300	1000 и 300
	Сеть наблюдений, м	—	500×50	(250—100)× ×(25—10)
	Густота сети наблюдений, ф. т./км ²	—	40	160—1000
Сейсморазведка КМПВ	Расстояние между сейсмопри- емниками, м	—	2	4—10
	Густота сети наблюдений, км/км ²	—	—	10
	Густота сети наблюдений, км/км ²	—	—	1—2
Магниторазведка	Масштаб съемок	1 : 200 000 и крупнее	В опытно- порядке 1 : 50 000—1 : 25 000	—
Гравирозведка	Масштаб съемок	1 : 200 000 и крупнее	—	—

ные задачи. При недостаточной геоэлектрической изученности территорий целесообразна постановка электрических зондирований с разносами $AB_{\max} = 4 \div 6$ км по сети примерно 5×2 км с отдельными сгущениями точек наблюдений на наиболее сложных участках. При значительной мощности лавовых образований отдельные пункты ВЭЗ могут быть выполнены с разносами AB_{\max} до 8—10 км.

При выделении перспективных площадей следует учесть ряд факторов, выявленных по геоморфологическим, геологическим и гидрогеологическим данным. В условиях Малого Кавказа к числу показателей, свидетельствующих о повышенной водообильности лавовых образований, следует в первую очередь отнести: локальные отрицательные формы поверхностного рельефа (долины рек, балки и т. п.), выходы родников, наличие зон разломов, депрессии в гипсометрической поверхности подлавовых образований.

Основной объем полевых геофизических работ выполняется на стадии детальных поисков, в процессе которых уточняется мощность лавовых образований и гипсометрия их подошвы; выявляются и прослеживаются зоны трещиноватых пород; определяются мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих лавовые образования. Применяются методы ВЭЗ, ЭП, возможна и магнитометрия.

Как показала практика работ, зоны повышенной трещиноватости, отличающиеся высокой водообильностью, характеризуются пониженными значениями удельных электрических сопротивлений. Ширина таких зон не менее 40—50 м. Поэтому электропрофилирование с шагом наблюдений в 25—50 м позволяет выделить указанные зоны. Подземный поток, стекающий со склона, концентрируется в наиболее гипсометрически низких участках лавового основания. В пределах этих локализованных площадей, выявленных с помощью ВЭЗ, и осуществляется ЭП. Обычно с успехом используется двухразносное симметричное ЭП, глубинность которого, как показывает практика, составляет примерно $1/5$ разносав AB установки. Для большей надежности в аномальных зонах, выявленных ЭП, желательно провести отдельные ВЭЗ.

Интерпретация электроразведочных данных, однако, не всегда дает однозначные результаты, поскольку минимумы ρ_k могут быть обусловлены также породами, обогащенными глинистым материалом. Поэтому целесообразно в комплексе с ЭП по тем же профилям применить магниторазведку (масштаба 1 : 50 000—1 : 25 000). Как известно, зоны трещиноватости в магматических породах обычно выявляются с помощью магниторазведки. Например, на Камчатке такие зоны совпадают с минимумами вертикальной слагающей магнитного поля. Аналогичная картина отмечается в Яно-Колымской зоне. Привлечение сейсморазведки и других сложных наблюдений нерационально

в связи с их высокой стоимостью, тем более, что использование ЭП в комплексе с ВЭЗ дает в общем удовлетворительные результаты: до 70 % пробуренных по геофизическим данным скважин отличаются высоким дебитом. Но эти результаты можно улучшить за счет применения магниторазведки. Остальные вопросы методики геофизических работ рассматриваются в табл. 15.

На стадии предварительной разведки полевые геофизические методы должны быть направлены на более детальное решение задач предыдущей стадии. Для этого можно использовать в качестве основы прежние методы, но по более густой сети наблюдений (см. табл. 15). Кроме того, перед геофизическими методами могут быть поставлены дополнительные задачи: изучение направления трещиноватости; определение изменения ее интенсивности с глубиной; установление уровня направления и скорости подземного потока. Для этого, помимо ВЭЗ и ЭП, следует привлечь сейсморазведку КМПВ (МПВ), КВЭЗ и МЗТ. Особенно важно включение в комплекс методов сейсморазведки. Ее высокая эффективность подтверждается опытом работ в аналогичных условиях как при гидромелиоративных съемках, так и при поисково-разведочных исследованиях на разных месторождениях полезных ископаемых. Можно также рассчитывать на высокую эффективность КВЭЗ в связи со значительной анизотропностью трещиноватых лавовых пород, коэффициент анизотропии λ_k которых достигает 2,5—3,0.

В качестве примера поисково-разведочных работ рассмотрим исследования, проведенные в 1967—1970 гг. под руководством Е. Г. Гулояна на площади, примыкающей с юго-запада к оз. Севан (рис. 15). Цель полевых работ заключалась в картировании подлавого рельефа и обнаружении концентрированных потоков подземных вод. Использован обычный комплекс методов, применяемых при детальных поисках: ВЭЗ и ЭП. ВЭЗ в зависимости от мощности лавовых образований выполнены с разносами AB_{\max} от 3 до 6 км. На различных участках расстояние между маршрутами ВЭЗ варьирует от 2 до 5 км, а шаг наблюдений от 1 до 2 км. По методу ВЭЗ дана оценка мощности лавовых образований и построены карты изогипс подлавого рельефа. ЭП проведено симметричной установкой $AA'MNB'V$ с разносами AB , варьирующими от 300 до 1000 м, и $A'B'$ — от 100 до 300 м. Шаг наблюдений преимущественно 50 м, местами, особенно в сложных условиях, он сокращен до 20—25 м. Расстояние между профилями составляет в среднем 500 м.

Зафиксированные на площади кривые ВЭЗ характеризуют различные типы геоэлектрического разреза — АКQH, АКQQ, АКQ, KQ и др. По данным ВЭЗ может быть выделено на площади до шести геоэлектрических горизонтов (табл. 15). Опорным в разрезе является 5-й горизонт (рис. 16). Наибольший

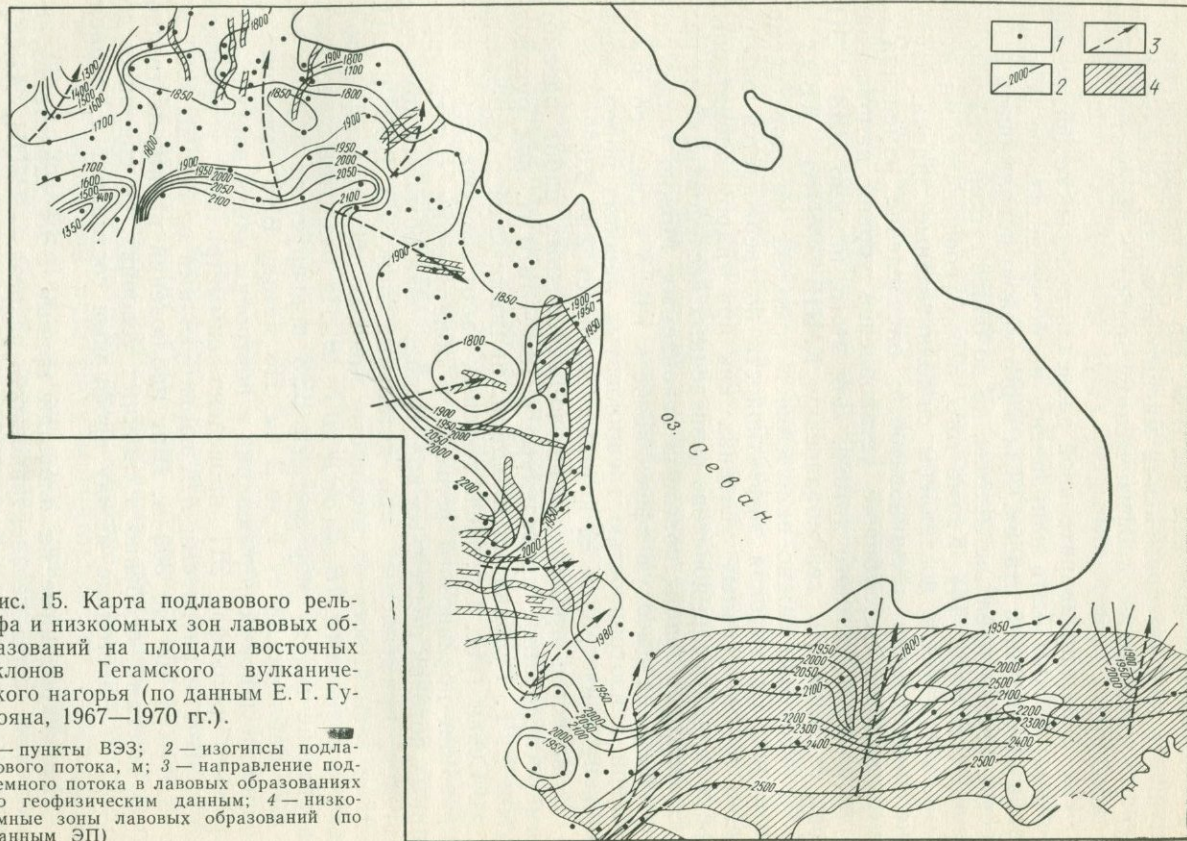


Рис. 15. Карта подлавого рельефа и низкоомных зон лавовых образований на площади восточных склонов Гегамского вулканического нагорья (по данным Е. Г. Гуляева, 1967—1970 гг.).

1 — пункты ВЭЗ; 2 — изогипсы подлавого потока, м; 3 — направление подземного потока в лавовых образованиях по геофизическим данным; 4 — низкоомные зоны лавовых образований (по данным ЭП)

Таблица 15

Номер горизонта	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Мощность h , м	Геофизическая и гидрогеологическая характеристика горизонтов
1	От 20 до 40	От 2—10 до 50—70	Аллювиально-делювиальные образования
2	От 200 до 1000	10—50	Ошлакованные эффузивы
3	От 200—500 до 1000—10 000	200—500	Базальты, андезиты; $\rho = 200 \div 500$ Ом·м, характеризует трещиноватые водообильные породы, более высокие значения — массивные, неводообильные
4	100—500	От 50—100 до 1000 и более	Водообильные разности лав, либо древний аллювий, либо песчано-глинистые породы N
5	От 5—10 до 50—100	—	Глины N — региональный водоупор
6	Сравнительно высокое сопротивление	—	Стратификация не ясна, возможно это отложения PZ, залегающие ниже регионального водоупора

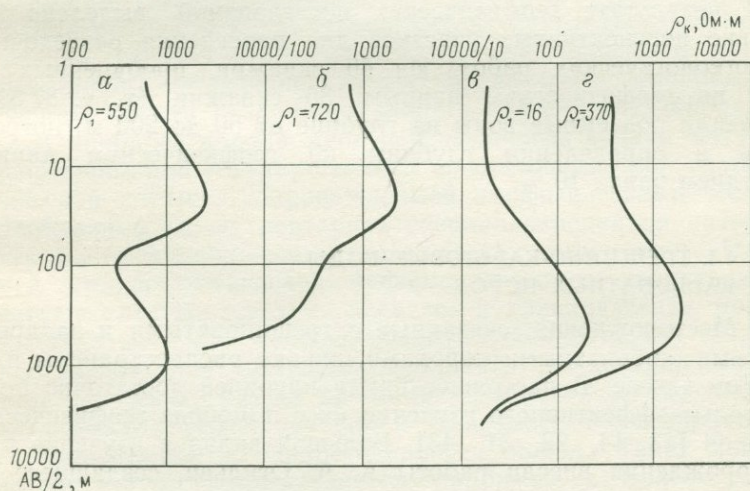


Рис. 16. Типичные кривые ВЭЗ в условиях лавовых покровов Армении (по данным геофизических исследований на площади Сюникского и Гегамского нагорий (по данным Е. Г. Гуляяна и Р. С. Минасяна, 1965 г.).

α — участок Раздан, тип I, ВЭЗ 18; β — участок Сюник, тип II, ВЭЗ 16; γ — участок Аван, тип III, ВЭЗ 8; ζ — участок Аван, тип IV, ВЭЗ 4

интерес при поисках подземных вод представляют участки пониженного рельефа подлавовых образований. На отрогах хребтов этим депрессиям могут соответствовать древние речные долины, по которым происходит движение подземных вод. Изучение рельефа подлавовых образований позволяет заключить, что разгрузка подземных вод идет непосредственно в оз. Севан.

Графики ЭП отличаются чрезвычайной изрезанностью, обусловленной как геоэлектрической неоднородностью лавовых образований, так и искажающим влиянием рельефа местности. Применена статистическая обработка этих графиков по методу скользящего среднего, позволившая выделить региональную и локальную составляющие сопротивления ρ_k . По величине региональной составляющей составлены карты, послужившие основой для выделения (по минимумам ρ_k) трещиноватых водообильных зон. Минимумы ρ_k могут соответствовать межлавовым и подлавовым потокам подземных вод. Для большей достоверности в зонах этих минимумов выполнены ВЭЗ. При этом наиболее характерны кривые вида АКQ либо КНК. Кривые первого вида свидетельствуют о наличии под массивными породами трещиноватых лавовых образований, а кривые второго вида — о залегании последних между выше- и нижележащими массивами слабообводненных пород. Выделение кривых ВЭЗ вида К с широким тупым максимумом высокого сопротивления говорит о значительной мощности массивных лавовых пород и отсутствии (либо небольшой мощности) водообильных образований.

В результате геофизических исследований выделено несколько перспективных участков для проведения разведочных гидрогеологических работ. Из 40 скважин, пробуренных на воду по геофизическим данным, 35 скважин (т. е. 87,5 %) встретили подземные воды на глубине от 50 до 200 м; погрешность в определении глубины по геофизическим данным в среднем равна 10 %.

4.4. ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫЕ ВОДЫ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Месторождения, связанные с трещиноватыми и закарстованными карбонатными породами, широко распространены в Советском Союзе. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт эффективного изучения их с помощью геофизических методов [13, 14, 22, 31, 43]. Большой вклад в изучение этих месторождений внесли работы А. А. Огильви, создавшего основу карстологических исследований геоэлектрическими методами.

Месторождения трещинно-карстовых вод образуются в различных природных условиях. В платформенных и субплатформенных условиях карбонатные толщи отличаются пологим за-

леганием; для горно-складчатых районов характерны различные складчатые формы — узкие, вытянутые с крутым залеганием пород (например, Урал), куполообразные (Центральный Казахстан, отчасти Тиман) и др. В одних случаях карбонатные породы распространены на больших площадях (южная окраина Московского артезианского бассейна, Устюрт), в других чередуются с метаморфическими, вулканогенными и различными осадочными отложениями (Урал). Мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих карбонатные толщи, также резко меняются: от долей метра до нескольких десятков метров. Дальнейшее увеличение мощности рыхлых образований ведет к образованию напорных (артезианских) вод.

При изучении месторождений трещинно-карстовых подземных вод используются все основные методы геофизических исследований. В наибольшей мере в настоящее время применяются разнообразные модификации электроразведки. Однако есть основание полагать, что в дальнейшем все в большей мере будут привлекаться для гидрогеологического изучения этих пород и другие методы, такие как микромагнитная съемка и гравиметрия.

Геофизические исследования ведутся при поисках и разведке месторождений трещинно-карстовых подземных вод. Задачами общих поисков являются: выявление основных складчатых и разрывных тектонических форм региона, оконтуривание выходов под наносами карбонатных пород, определение мощности рыхлых образований, перекрывающих эти породы, оценка мощности карбонатных пород (определение глубины залегания регионального водоупора, подстилающего карбонатные толщи), выделение крупных по площади зон повышенной трещиноватости и закарстованности карбонатных пород.

В наиболее полной мере перечисленные задачи могут быть разрешены при государственной среднемасштабной гидрогеологической съемке, сопровождаемой геофизическими методами. Необходимо также повторная специализированная интерпретация ранее накопленных геофизических материалов. Наибольшей гидрогеологической информативностью характеризуются методы электроразведки; магнито- и гравиразведка могут использоваться для тектонического районирования, выявления зон разломов и локальных поднятий. Сейсморазведка позволяет расчленить разрез на основные горизонты, выделить зоны разломов и другие структуры и обнаружить площади усиленной трещиноватости и закарстованности пород. Такая повторная интерпретация осуществляется, например, в Волго-Уральской области, где ранее проведен большой объем геофизических работ при поисках и разведке нефтяных месторождений. При отсутствии перечисленных материалов в необходимых случаях могут быть организованы специальные полевые работы, которые обычно ограничиваются постановкой ВЭЗ по редкой сети

наблюдений — $(2-5) \times (0,5-2)$ км. Глубина исследований в зависимости от геологических условий существенно меняется. При значительной мощности карбонатных отложений можно ограничиться предельной мощностью зоны трещинно-карстовых пород; обычно она не превышает 50—100 м. В других случаях глубина разведки в 200—400 м обеспечивает оценку мощности всей толщи карбонатных пород. Для общих поисков целесообразно осветить значительные площади, определяемые тысячами и даже десятками тысяч квадратных километров.

При детальном поиске перечисленные задачи разрешаются более детально. Возникают и новые задачи: оценка мощности трещинно-карстовых образований; изучение литологического состава рыхлых отложений, перекрывающих карбонатные породы (для приближенной оценки фильтрационных свойств аллювиально-делювиальных пород и оконтуривания участков, где рыхлые породы могут представлять интерес для водоснабжения); сравнительная (иногда полуколичественная) оценка фильтрационных свойств карбонатных пород; оконтуривание участков, где циркулируют пресные и минерализованные воды. Методы исследований включают ВЭЗ, ЭП, магниторазведку, КВЭЗ, МЗТ, сейсморазведку КМПВ (МПВ) и некоторые другие. Основными методами служат ВЭЗ и ЭП. Ими более или менее равномерно освещается вся площадь исследований. Остальные методы применяются как дополнительные. Они обычно проводятся по отдельным профилям либо в разрозненных пунктах. Результативный масштаб детальных поисков — $1:50\,000$, реже $1:25\,000$. Площадь исследований, как показывает практика, в горно-складчатых районах составляет в среднем 40—50, реже 100 км², в платформенных условиях обычно больше — от 100 до нескольких сотен квадратных километров, в среднем 300—400 км². Глубина разведки составляет 50—100 м, реже 150—200 м.

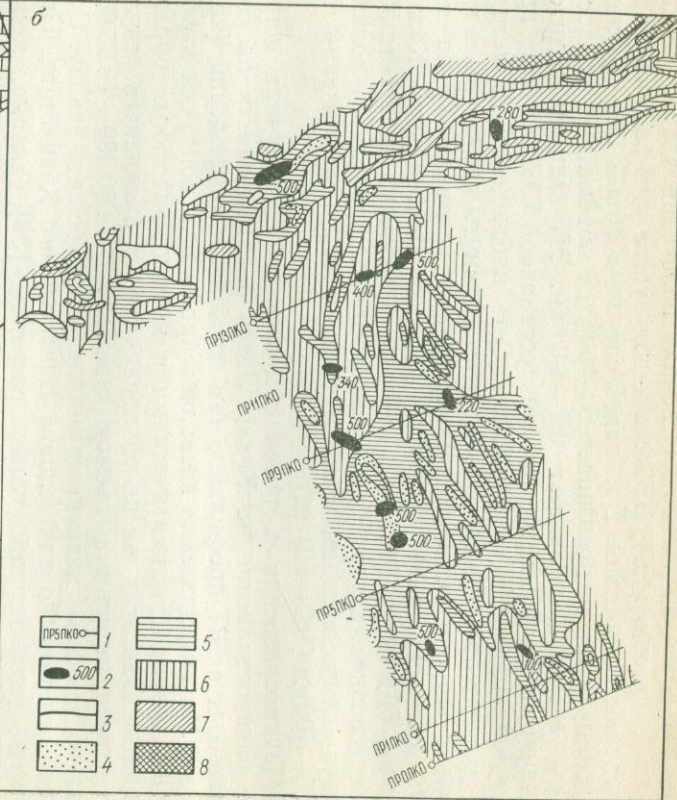
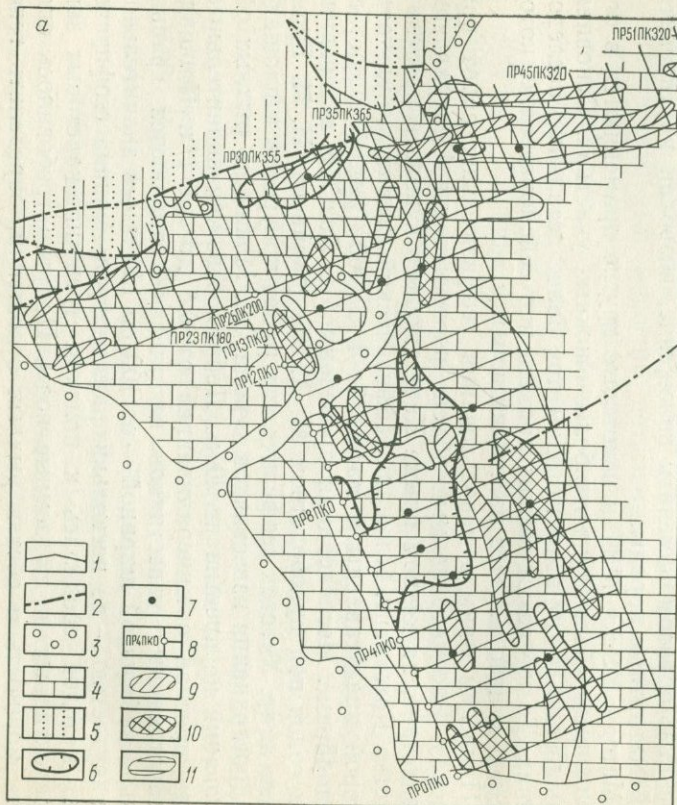
Остановимся на особенностях применения отдельных геофизических методов. Наиболее существенным является вопрос о взаимной роли методов ВЭЗ и ЭП. В условиях пологого залегания карбонатных пород основная роль при детальном поиске принадлежит ВЭЗ. С их помощью осуществляется площадная съемка по сети $(1-2) \times (0,25-0,5)$ км (чаще $1 \times 0,5$ км) с $AB_{\max} = 1-2$ км. Профили ориентируются вкрест простирания основных структур или перпендикулярно речным долинам. В этих условиях ЭП либо не выполняется, либо проводится по ограниченному участку для детализации аномалий, выявленных ВЭЗ. Например, на площади южного крыла Московского артезианского бассейна с указанной целью осуществляется двухгоризонтное симметричное профилирование с $AB = 300 \div 900$ и $A'B' = 75 \div 200$ м по сети $(500-1000) \times 50$ м. При изучении месторождений горно-складчатых районов, когда структуры четко вытянуты, а мощность рыхлых отложений невелика,

роль ЭП резко возрастает. Основная поисковая задача реализуется с помощью ЭП, ВЭЗ же используется для расшифровки выявленных аномалий. При такой ситуации объем ВЭЗ в физических пунктах не превышает 5—10 % от объема ЭП, разность AB_{\max} обычно составляет 0,5—1,0 км. ЭП чаще проводится с двухразной симметричной установкой AA'MNB'B при $AB=500 \div 1000$, $A'B'=150 \div 300$ м. Сеть наблюдений по методу ЭП зависит от того, насколько четко вытянуты структуры и насколько широки аномалии. Например, в условиях Урала используется сеть $1000-2000 \times 25-50$ м, в Центральном Казахстане — 50×50 м. Иногда, однако, в сложных геоэлектрических условиях, когда ЭП малоэффективно, приходится пользоваться лишь методом ВЭЗ с густой сетью наблюдений до $(500-100) \times (100-50)$ м.

Магниторазведка в обычной модификации получила широкое распространение на Урале. Здесь она проводится на совмещенных с ЭП профилях с тем же шагом наблюдений (25—50 м). Магниторазведка позволяет проследить контакты карбонатных пород с магматическими и метаморфическими образованиями. Для этих же целей привлекаются имеющиеся результаты гравитационных съемок масштаба $1 : 50\,000 \div 1 : 25\,000$. Однако не всегда названные методы могут решить задачу. Особенно это заметно для условий Центрального Казахстана. Применение высокоточной магниторазведки [32], видимо, может коренным образом изменить положение, позволяя картировать слабомагнитные породы.

Методы КВЭЗ, МЗТ и некоторые другие применяются в ограниченных объемах на наиболее сложных участках. Основная роль принадлежит этим методам при более детальном исследовании. То же самое можно сказать и о сейсморазведке, которая редко используется на стадии поисков.

Приведем пример использования геофизических работ при поисках. Рассматриваемый объект расположен в Центральном Казахстане, на южном крыле Керегетаского купола в пределах участка Кожамсит. Площадь геофизической съемки, результаты которой представлены в масштабе $1 : 25\,000$ (рис. 17), составляет 45 км^2 . Исследования проведены МГ КазССР в середине 60-х годов под руководством М. А. Хордикайна, И. И. Гринбаума и др. Участок геофизических работ приурочен к площади распространения известняков турона C_{1t} . Мощность рыхлых образований не превышает 20 м. Дебиты скважин значительные. Вода пресная с минерализацией от 0,8 до 1,1 г/л. Площади закарстованных известняков на участке отличаются сравнительно небольшой шириной — от 100 до 150 м — и значительной вытянутостью — до нескольких километров. Задача геофизических методов сводилась к поискам трещинно-карстовых зон, перспективных на подземные воды. Попутно требовалось оценить мощность и состав рыхлых отложений, определить гене-



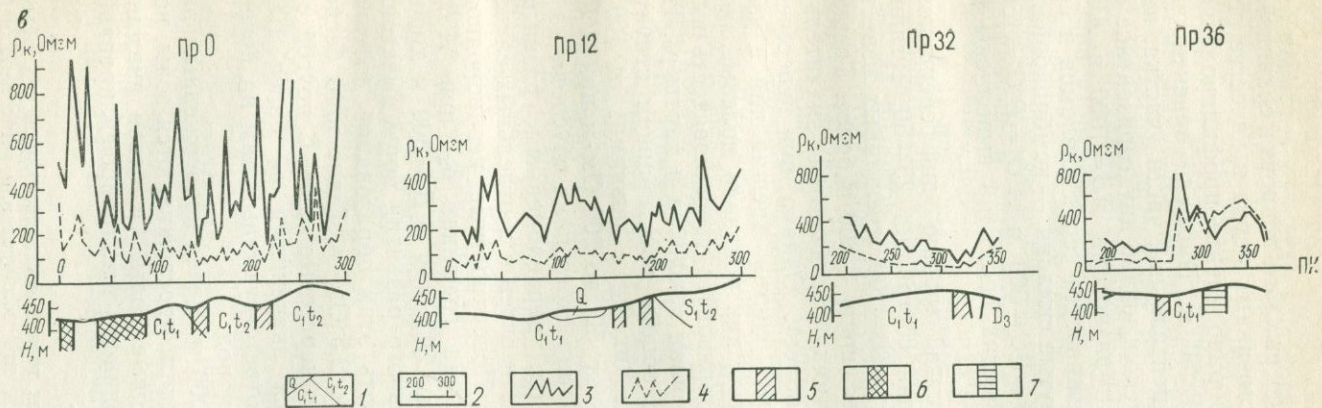


Рис. 17. Результаты геофизических работ с целью поисков подземных вод по участку Кожамсит, Центральный Казахстан (по материалам МГ КазССР, 1966 г.).

a — карта основных результатов ЭП: 1 — геологические границы; 2 — тектонические нарушения по геологическим данным; выходы пород: 3 — четвертичные песчано-глинистые отложения 4 — известняки C_1 ; 5 — доломиты и песчаники D_3 ; 6 — зоны развития мощной коры выветривания по геофизическим данным; 7 — пункты ВЭЗ и КВЭЗ; 8 — профили ЭП с указанием их номеров и номеров пикетов; перспективные на воду зоны: 9 — I типа, 10 — II типа, 11 — III типа (см. текст); б — карта кажущихся сопротивлений ρ_k при АВ = 1000 м: 1 — профили и пикеты ЭП; 2 — эллипс анизотропии ρ_k по данным КВЭЗ с указанием разносов АВ/2, м; 3 — границы между различными зонами ρ_k ; зоны ρ_k : Ом · м: 4 — менее 100, 5 — от 100 до 200; 6 — от 200 до 500, 7 — от 500 до 1000, 8 — более 1000; в — графики ЭП: 1 — геологические границы и индексы; 2 — пикетаж вдоль профилей; графики ρ_k симметричного профилирования: 3 — АВ = 1000 м, 4 — А'В' = 300 м; перспективные на воду зоны: 5 — I типа, 6 — II типа, 7 — III типа

ральное направление трещиноватости и мощности закарстованных пород.

В связи с малой мощностью рыхлого покрова и сравнительно небольшой мощностью закарстованных пород в качестве основного метода исследований избрано электропрофилирование по сети 500×50 м, местами 250×50 м. Профили ориентированы вкрест простирания пород. В центральной части участка, имеющей более простое строение, использовано двухгоризонтное симметричное профилирование с разносами $AB=1000$ и $A'B'=300$ м, а на севере, где прослеживается серия разломов и сравнительно узкие линейно-вытянутые складки, — комбинированное профилирование (КЭП) с $AO=BO=500$ и $A'O'=B'O'=150$ м. В зоне отдельных геоэлектрических аномалий выполнены ВЭЗ и КВЭЗ с AB_{\max} до 1 км^1 .

Геологический разрез участка хорошо дифференцирован. Сопrotивление (в $\text{Ом}\cdot\text{м}$) глин составляет $25-50$, суглинков с обломками коренных пород — $80-100$, трещинных известняков — $30-300$, массивных известняков — 800 и более. Трещиноватые закарстованные известняки отличаются значительной анизотропностью ($\lambda_{\text{к}}=2,7$ и более). Однако при пересечении двух взаимно перпендикулярных систем трещин или в узких карстовых зонах КВЭЗ не могут, как показали полевые эксперименты, в полной мере охарактеризовать трещиноватость пород.

По данным ЭП составлены план графиков и карты $\rho_{\text{к}}$. Изолинии $\rho_{\text{к}}$ обычно совпадают с общим простиранием структур. Отмечается частая смена высоких $\rho_{\text{к}}$ с низкими: от 100 до $500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $AB=1000$ м и от 50 до $200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $A'B'=300$ м. Дифференциация электрического поля обусловлена неоднородностью коренных пород, неравномерным развитием различных по составу и мощности слоев и в отдельных случаях влиянием рельефа местности. Поверхностные неоднородности особенно заметно отражаются на графиках $\rho_{\text{к}}$ при $A'B'=300$ м. Вместе с тем по данным ЭП при $A'B'=300$ м хорошо оконтуриваются зоны значительного развития коры выветривания каолинового типа. Мощность этих образований достигает 17 м при сопротивлении ρ около $2,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Такие зоны бесперспективны на обильные трещино-карстовые воды. С другой стороны, области характеризуются значениями $\rho_{\text{к}}$ более $100-150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при $A'B'=300$ м, соответствуют выходам на поверхность массивных неветрелых пород.

По графикам $\rho_{\text{к}}$ при $AB=1000$ м, менее подверженным разного рода поверхностным влияниям, прослеживаются зоны, перспективные на трещинно-карстовые воды. Основное внимание исследователи уделяли симметричному электропрофилированию

¹ Объем ВЭЗ (КВЭЗ) в физических точках составляет лишь 1% объема ЭП. Просмотр материалов показывает, что зондирований выполнено недостаточно.

(СЭП), графики же комбинированного профилирования (КЭП) использованы в качестве вспомогательных при выделении проводящих зон.

Графики СЭП подразделены на три типа. Тип первый характеризуется резким понижением ρ_k на больших и малых разносах AB на общем фоне высоких значений ρ_k и сближением обоих графиков на уровне 100—200 Ом·м. Выделенная мощность низкоомных зон небольшая. Такая картина характерна для закарстованных участков ядер антиклинальных структур. Тип второй отмечается пилообразным характером графиков ρ_k . Аномальные зоны такого типа имеют в плане изометрическую конфигурацию и отличаются развитием сильно трещиноватых закарстованных пород S_1 . Коэффициент кажущейся анизотропии¹ λ_k в их пределах достигает значительных величин. Аномалии третьего типа характеризуются превышением значений ρ_k для малых разносов AB над большими. Зоны этого типа отвечают глубокому залеганию закарстованных пород.

При постановке ВЭЗ над закарстованными участками при низком положении уровня грунтовых вод и отсутствии глинистого экрана зафиксированы кривые типа КН, на которых максимум ρ_k отображает сухие известняки зоны аэрации, а минимум — водоносные известняки. Если сверху залегают глинистые породы, кривые этого типа (КН) трансформируются в кривые типа А. По данным ВЭЗ карст распространен до глубин 70—80 м, местами до 150 м и более. Отсюда следует вывод, что гидрогеологические скважины должны иметь глубину 80—100 м; результаты ВЭЗ хорошо подтверждаются электрокаротажем.

Для определения направления подземного потока использовался комплекс методов. При выявлении в разрезе наиболее проницаемых зон вначале проводился картаж, затем МЗТ. Здесь же у скважины выполнялись КВЭЗ. Обычно простирания наблюдаемых разными методами фигур совпадают.

В результате геофизических работ установлено, что верхняя часть разреза характеризуется в целом невысоким сопротивлением, около 300 Ом·м, что свидетельствует о значительной закарстованности пород и их обводненности практически по всей площади. В целом геофизический прогноз получил подтверждение при последующих исследованиях.

При предварительной разведке основное внимание исследователей сосредоточивается на решении задач, связанных с изучением трещиноватости пород и уточнением некоторых вопросов гидродинамики. На этом этапе (помимо более детального решения некоторых задач, стоящих на поисковой стадии) требуется выявить генеральное направление трещиноватости; окон-

¹ Коэффициентом кажущейся анизотропии λ_k называется отношение максимального кажущегося сопротивления ρ_k к минимальному, устанавливаемое по эллипсам анизотропии с помощью метода КВЭЗ.

турить наиболее крупные карстовые воронки или их группы; дать более детальное расчленение пород в разрезе и выяснить, как изменяются интенсивность трещиноватости и закарстованность с глубиной; оценить характер и степень кольматации карбонатных пород глинистым материалом; определить уровень, направление и скорость подземного потока; уточнить области питания и разгрузки; выяснить гидравлическую связь трещиннокарстовых вод с речными; определить радиус депрессионных воронок при детальном откачке; осуществить режимные наблюдения за изменением минерализации подземных вод и др.

На стадии предварительной разведки широко используются методы, эффективно применяемые при поисках (ВЭЗ, ЭП, магниторазведка), а также такие методы, как КВЭЗ, МЗТ, метод естественных полей, ВЭЗ-ВП, сейсморазведка КМПВ (МПВ), термометрия и резистивиметрия в полевом варианте и др. Практически, конечно, не требуется использовать все перечисленные методы. По мере накопления опыта в каждом регионе устанавливается наиболее оптимальный комплекс методов.

Результативный масштаб геофизических исследований при предварительной разведке 1 : 10 000, в более простых условиях (при пологом залегании пород и т. п.) — 1 : 25 000, в наиболее сложных — 1 : 5000. Глубина исследований такая же, как и при детальном поиске. Площадь исследований в горно-складчатых районах не превышает нескольких квадратных километров, в платформенных условиях достигает 10—20 км². Профили геофизических основных наблюдений располагаются через 250—100 м, шаг наблюдений для ЭП составляет 50—25, иногда 10 м, для ВЭЗ — 100 м, реже 50 м. При столь значительной густоте наблюдений целесообразно пользоваться установкой непрерывного электрического зондирования. Сейсморазведка МПВ (КМПВ) проводится с шагом 5—10 м. На небольших площадках осуществляются наблюдения по методу ЕП по весьма густой сети — (10—20) × (5—10) м.

4.5. ТРЕЩИННО-ПЛАСТОВЫЕ НАПОРНЫЕ ВОДЫ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ

В разделе 3.6 были рассмотрены месторождения, обусловленные напорными водами артезианских бассейнов, циркулирующих в гранулярных породах. Более важное практическое значение имеют аналогичные месторождения, в которых водовмещающими породами являются скальные и полускальные породы: трещиноватые, иногда закарстованные известняки, доломиты, мергели, меловые породы, либо трещиноватые песчаники. Такого типа месторождения широко распространены в центральных и северо-западных районах Русской платформы, на территории Восточно-Сибирской платформы и в других местах. Для

них характерно наличие водоупорной толщи, отделяющей напорные воды от грунтовых. От аналогичных месторождений, в которых коллекторами являются рыхлые породы (пески, гравий, галечники), они отличаются резкой неоднородностью фильтрационных свойств водовмещающих пород. Это заметно сказывается на методике геофизических исследований.

Месторождения напорных вод, связанные с трещинно-пластовыми и трещинно-пластово-карстовыми породами, с позиций разведочной геофизики можно подразделить на два подтипа. Для первого из них характерна значительная мощность водовмещающих пород, трещиноватость которых постепенно затухает с глубиной. Такая геологическая обстановка (получившая распространение в условиях Русской платформы) в общем благоприятна для применения геофизических методов: целевой горизонт легко дифференцируется от вышележащих отложений, представленных песчано-глинистыми рыхлыми образованиями. Второй подтип, менее благоприятный для изучения, отличается малой мощностью водовмещающих пород, представленных несколькими горизонтами песчаников, известняков, залегающих среди рыхлых песчано-глинистых пород; подобная ситуация довольно часто отмечается в молодых отложениях Азово-Кубанского и Причерноморского артезианских бассейнов.

С помощью геофизических методов исследования при изучении первого подтипа месторождений решаются следующие задачи: определение глубины залегания водоносного горизонта (комплекса), выявление эрозионных врезов, затрагивающих изучаемый горизонт; расчленение по литологическому составу рыхлых пород, перекрывающих целевой горизонт, определение мощности и сравнительная оценка его фильтрационных свойств; изучение складчатой и разрывной тектоники исследуемой территории; оценка трещиноватости (закарстованности) водовмещающих пород; выявление и оконтуривание участков с наиболее разрушенными породами; разграничение в пределах изучаемого горизонта площадей с пресной и соленой водой; определение мощности зоны интенсивной трещиноватости в изучаемом водоносном горизонте; выявление площадей, где имеет место активная гидравлическая связь между изучаемыми напорными и грунтовыми водами; изучение гидрогеологического строения разреза ниже напорного горизонта с целью определения возможностей гидравлической связи целевого горизонта с более глубокими.

Для решения этих задач в настоящее время используется электроразведка методом ВЭЗ и сейсморазведка с взрывными источниками возбуждения упругих волн. Метод ВЭЗ применяется наиболее часто. Целесообразно также использование фондовых материалов. Полевые геофизические методы широко применяются на стадиях общих и детальных поисков и довольно редко — при предварительной разведке.

На стадии общих поисков необходимо дать приближенное решение первых сформулированных выше пяти задач. Для этого наиболее целесообразно использовать материалы среднемасштабных гидрогеологических съемок (с данными электро-разведочных работ), охватывающих в основном верхнюю часть разреза (до 300—500 м), и результаты более глубинных исследований по фондовым материалам. Первые включают обычно ВЭЗ с $AB=2 \div 4$ км по сети $(4-8) \times (1-2)$ км, вторые — помимо гравимагнитных наблюдений, те же зондирования, но с большими разносами (до 10—20 км), методы ТТ, МТЗ и т. п., а также сейсморазведку КМПВ и МОВ. Если для среднемасштабных гидрогеологических исследований опорным (и одновременно самым глубоким) горизонтом является, как правило, поверхность мощных карбонатных отложений, то для региональных и нефтеразведочных работ — поверхность кристаллического фундамента.

Оконтуривание участков с трещиноватыми закарстованными породами является весьма трудной задачей, решаемой лишь на основе многофакторного анализа. Подробно этот вопрос рассмотрен в работе [17], где описаны результаты общих поисков месторождений подземных вод в центральной части Московского артезианского бассейна.

Разграничение в пределах изучаемого горизонта участков трещиноватых пород с пресной и соленой водой производится с помощью метода ВЭЗ. Трещиноватые породы с соленой водой фиксируются в виде обширных площадей с резко пониженным сопротивлением. Интерпретация, однако, неоднозначная, поскольку аналогичными аномалиями могут отличаться и участки с глинизированными породами. При резком изменении глубин ответ на вопрос можно получить на основе сопоставления глубин залегания горизонта (установленной по ВЭЗ или КМПВ) с величиной минерализации подземных вод (по данным бурения).

При прогнозировании месторождений трещинно-пластовых (в том числе и карстово-пластовых) вод важное значение приобретает изучение ряда косвенных признаков, определяемых глубинной тектоникой артезианских бассейнов (см. раздел 3.6). В связи с прямыми поисками нефти и выявлением разного рода неотектонических ловушек в последнее время получает развитие новое направление, ориентированное на изучение физики среды за счет выявления разного рода зональных аномалий. Результаты этих исследований дают полезную информацию как для прогнозирования нефти, так и для характеристики гидрогеологических условий артезианских бассейнов.

Результаты общих поисков артезианских пластово-трещинных подземных вод обычно оформляются в виде карт и разрезов масштаба 1:200 000. Эти исследования охватывают боль-

шие площади, порядка нескольких тысяч и даже десятков тысяч квадратных километров. Такие исследования выполнены на территории Русской платформы вдоль северной окраины Донбасса, вблизи Окско-Цнинского вала [31], в северо-западной части Московского артезианского бассейна [17] и в других районах.

Геофизические исследования вдоль северной окраины Донбасса проводятся в течение ряда лет с целью обнаружения месторождений пресных подземных вод. Здесь у поверхности залегают песчано-глинистые неоген-четвертичные и палеогеновые отложения, в них циркулируют преимущественно пресные воды. Ниже распространена мергельно-меловая толща K_2 , насыщенная пресными и солоноватыми водами. Под отложениями K_2 залегают песчано-глинистые породы C_2 ; подземная вода в этих отложениях сконцентрирована в отдельных горизонтах песчаников и известняков, ее минерализация составляет 2—9 г/л. Наиболее водообильной является мощная толща залегающих на глубине 300—400 м и более известняков C_1 ; минерализация подземных вод в них значительно меняется.

Рассмотрим работы треста Днепрогеофизики, выполненные на этой территории в 1971 г. под руководством А. А. Нагоши и А. Ф. Маляра, исследовавших так называемый Деркульский участок площадью 2500 км². Общие поиски перспективных площадей осуществлялись на основе специальных полевых электро-разведочных наблюдений по съемкам прошлых лет. Основная задача геофизических исследований заключалась в оценке минерализации подземных вод в карбонатных отложениях C_1 и оконтуривании участков с пресными водами. Попутно определялась глубина залегания этих пород и расчленялся разрез вышележащих отложений.

Поставленные задачи разрешены методом ВЭЗ с $AB_{max} = 4$ км по сети наблюдений $(3-5) \times 1$ км, что обеспечило масштаб результативных карт 1:100 000—1:200 000. Кривыми ВЭЗ зафиксирован разрез типа НКН или АКН: $\rho_1 \leq \rho_2 < \rho_3 > \rho_4 < \rho_5$. В этом разрезе первый горизонт объединяет четвертичные отложения и верхи неогена, его сопротивление $\rho_1 = 5-60$ Ом·м, мощность $h_1 \leq 60$ м. Второй горизонт охватывает нижние горизонты N и верхние горизонты K_2 , $\rho_2 = 5 \div 50$ Ом·м, $h_2 = 30 \div 100$ м. Третий горизонт характеризует основную часть мергельно-меловой толщи, $\rho_3 = 10 \div 30$ Ом·м, $h_3 = 150 \div 300$ м. Четвертый горизонт соответствует терригенной толще C_2 , $\rho_4 = 5 \div 20$ Ом·м, $h_4 = 0 \div 300$ м. Пятый горизонт — известняки C_1 , обладающие значительной мощностью, их сопротивление резко меняется: от 10 Ом·м на юго-западе (минерализация подземных вод до 50 г/л) до 2000 Ом·м на северо-востоке (минерализация подземных вод около 1 г/л).

Интерпретация данных электроразведки заключалась в составлении карт кажущихся сопротивлений ρ_k , а также в основной интерпретации кривых ВЭЗ, отраженной в геоэлектрических разрезах; на заключительном этапе по данным ВЭЗ и электрокаротажа скважин изучались корреляционные связи электрического сопротивления известняков C_1 с минерализацией насыщающих их подземных вод.

На геоэлектрических разрезах и картах изоом выделены четкие минимумы сопротивлений ρ_k , которые хорошо коррелируются от профиля к профилю. Узкие зоны низких сопротивлений совпадают в общих чертах с тектоническими нарушениями, ранее выделенными по гравимагнитным наблюдениям. Это дало основание проследить на площади по данным ВЭЗ серию разломов.

Как показал опыт нескольких лет, удовлетворительные результаты при оценке минерализации подземных вод в известняках C_1 дает анализ карты ρ_k при $AB=3$ км. Установлена возможность выделения трех зон различной минерализации: а) менее 3 г/л ($\rho_k=60\div 140$ Ом·м), б) от 3 до 10 г/л ($\rho_k=30\div 60$ Ом·м) и в) более 10 г/л ($\rho_k=15\div 30$ Ом·м) (см. рис. 10). Данные бурения подтверждают надежность этого решения. Изменения трещиноватости и глинистости карбонатных пород в пределах изученных площадей сравнительно небольшие, поэтому именно минерализация подземных вод решающим образом влияет на величину сопротивления изучаемых пород.

В 1963—1964 гг. кафедрой геофизики МГУ под руководством А. А. Огилви проводились исследования в Мордовии с целью выявления запасов артезианских вод глубокозалегающих карбонатных пород C_1 . Требовалось оконтурить наиболее трещиноватые водообильные площади с пресной водой. Задача успешно разрешена на основе изучения методом ВЭЗ гипсометрии поверхности известняков C_1 .

Установлено, что в зоне антиклинальных структур распространены наиболее водообильные карбонатные породы с пресной водой. Результаты исследований подробно рассмотрены в работе [31].

На стадии детальных поисков необходимо дать более точное решение задач предварительных поисков. Основным методом исследований остается ВЭЗ. В ограниченных объемах по отдельным профилям целесообразно применить КМПВ с целью локализации трещиноватых зон. При сравнительно малой глубине перспективных зон — до 100—150 м — можно использовать также ЭП с большими разносами АВ (до 1000 м). Детальные поиски целесообразно проводить преимущественно в масштабе 1 : 100 000—1 : 50 000 с детализацией на отдельных участках. Площадь исследуемых площадей 300—400 км². Основная сеть наблюдений по методу ВЭЗ с $AB_{\max}=2\div 4$ км составляет (1000—5000) ×

× (500—1000) м (чаще (1000—2000) × 1000 м), по методу ЭП (1000—2000) × (50—100) м. В случае слабодифференцированных по электрическому сопротивлению рыхлых пород на наиболее перспективных участках желательна постановка ВЭЗ-ВП.

На стадии предварительной разведки представляется возможным уточнить решения поисковой стадии, детально изучить вопрос о взаимосвязи напорных, грунтовых и поверхностных вод участка, а также исследовать разрез ниже напорного горизонта. Практический опыт таких работ в настоящее время по существу отсутствует. Однако анализ результатов применения геофизических работ в смежных областях геологической разведки позволяет предполагать, что и при предварительной разведке геофизические методы могут применяться в необходимых случаях с высоким эффектом. По-видимому, результативный масштаб таких исследований должен составлять 1 : 50 000 — 1 : 25 000, причем ведущее место в них должны занимать сейсмические методы (как КМПВ, так и МОВ). Последний метод можно с успехом использовать для расчленения толщи карбонатных пород, выявления и прослеживания в ней маломощных глинистых водоупоров (типа верийских глин Московского артезианского бассейна), обнаружения зон разломов глубокого заложения и др. При изучении же приповерхностной части разреза ведущее место сохраняется за методом поисковой стадии.

Рассмотрим второй подтип месторождений, который характеризуется малой мощностью водовмещающих пород, представленными несколькими горизонтами песчаников, известняков, залегающих в мощной толще рыхлых песчано-глинистых образований. Как правило, это молодые породы, обычно неогенового возраста, довольно значительно дислоцированные альпийскими тектоническими движениями складчатого и разрывного характера.

Опыт изучения рассматриваемого подтипа месторождений накоплен в основном на территории Степного Крыма. Как показывает практика, при изучении указанных месторождений геофизическими методами можно осуществить: геологическое картирование толщ пород, включающих водоносные горизонты; определить мощности и приближенный состав песчано-глинистых пород, перекрывающих комплекс исследуемых водоносных горизонтов; оценить минерализацию напорных вод, циркулирующих в этих горизонтах; определить уровень грунтовых вод. Решение перечисленных задач обеспечивает проведение детальных поисков. При общих поисках выполнение специальных геофизических работ вряд ли целесообразно. Исследования осуществляются на базе анализа геологических, гидрогеологических и геофизических материалов. Опыта применения геофизических работ при детальной разведке нет. Видимо, лишь про-

ведение сейсморазведочных работ КМПВ и МОВ может существенным образом дополнить информацию.

Для решения задач детальных поисков, как правило, достаточно метода ВЭЗ. Судя по опыту работ в Крыму, такие исследования выполняются на площади 300—600 км² в масштабе 1:50 000. Глубина исследований составляет 200—300 м. Зондирования проводятся с $AB_{\max} = 2 \div 4$ км по сети $1,0 \times 0,5$ км. На наиболее интересных и сложных участках сеть сгущается до $0,5 \times 0,25$ км.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В КРИОЛИТОЗОНЕ

5.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ

В области распространения многолетнемерзлых пород различными исследованиями выделяются несколько разновидностей месторождений подземных вод. Среди них можно назвать три основных типа наиболее изученных месторождений: 1) месторождения грунтовых вод песчано-галечниковых отложений таликовых зон, 2) месторождения артезианских бассейнов подмерзлотных напорных вод, 3) месторождения зон разломов и трещиноватых пород (см. рис. 9). Перечисленные типы не охватывают все возможные виды крупных месторождений в криолитозоне. Например, месторождения конусов выносов, подгорных шлейфов и закарстованных карбонатных пород также могут использоваться для крупного водоснабжения. Однако опыт геофизических исследований их отсутствует.

Отрицательная температура, обуславливающая образование мерзлых пород, способствует существенному изменению их физических свойств. Практически это особенно заметно при проведении геоэлектрических, сейсмических и геотемпературных исследований. При других видах геофизических наблюдений — магнито-, грави- и радиометрии — такие изменения менее ощутимы. Заметная связь электрических, упругих и тепловых параметров с геокриологическими характеристиками пород способствовала тому, что электро-, сейсмо- и терморазведка стали важнейшими методами геофизических работ на Севере, в том числе и при поисках и разведке подземных вод. С другой стороны, использование этих методов совместно с другими, на результаты которых слабо влияют геокриологические условия, дает достаточно полное и более однозначное решение задач.

Среди многочисленных методов наземных и воздушных геофизических исследований, опробованных в условиях Севера, лишь часть их получила широкое практическое применение при изучении месторождений подземных вод. Это методы электро-разведки постоянным током — ЭП, ВЭЗ в различных модификациях; в меньшем объеме используются резистивиметрия открытых водоемов, МЗТ, методы ЕП и ВП, ДЭМП, гравиметрия, наземная магниторазведка (с измерением вертикальной составляющей магнитного поля), сейсморазведка МПВ или КМПВ и термометрия в неглубоких горных выработках. В смежных областях геологической разведки нашли применение и другие геофизические методы (например, микромагнитная съемка, раз-

личные модификации высокочастотных электромагнитных методов, радиометрия), которые при определенных обстоятельствах можно с успехом применять при поисках и разведке подземных вод.

Большая заслуга в разработке геокриологических исследований геофизическими методами при поисках и разведке подземных вод принадлежит А. Т. Акимову, Б. Н. Достовалову [2], В. А. Кириллову (1975 г.), А. А. Огильви [23], В. Б. Пугачу [34], В. С. Якупову [2, 3, 41] и многим другим. Разработки этих авторов легли в основу данного раздела.

При поисках и разведке пресных подземных вод в зоне распространения многолетнемерзлых пород можно выделить три основных направления геофизических исследований; а) геологические, б) геокриологические и в) собственно гидрогеологические. Границы между этими направлениями в значительной мере условны. Каждое направление включает серию частных задач, совокупное решение которых позволяют на стадии поисков выявить перспективные площади, а на стадии разведки уточнить гидрогеологические параметры участка, необходимые для подсчета запасов подземных вод и выяснения условий их эксплуатации. Рассмотрим общие приемы интерпретации геофизических данных при решении частных задач. Основное внимание уделим методам, нашедшим широкое применение в гидрогеологической практике, либо в смежных областях при аналогичных исследованиях.

Оценка мощности и состава рыхлых пород, перекрывающих скальное основание. При незначительной мощности многолетнемерзлых пород, залегающих лишь в самой верхней части рыхлой толщи, методики определения суммарной мощности рыхлых образований в криолитозоне и более южных климатических зонах в принципе не различаются. При увеличении мощности многолетнемерзлых пород решение задачи осложняется. При этом можно использовать электроразведку, сейсморазведку, высокоточную гравиметрию; другие методы применяются эпизодически.

Из методов электроразведки часто привлекается ВЭЗ, иногда в комплексе с ЭП, если разрез мало изменяется в пределах участка. Наиболее простым случаем является такой, когда литологический состав пород практически не изменяется по разрезу. В зависимости от мерзлотных условий в такой обстановке могут фиксироваться кривые ВЭЗ, типа К, КН, КQ и др. В летнее время разрез усложняется в связи с образованием низкоомного горизонта, приуроченного к слою сезонного протаивания. Еще более сложным становится разрез, если рыхлые образования сложены из нескольких литологически различных горизонтов. В настоящее время предложены специфические приемы интерпретации в этих условиях (В. А. Кириллов и др., 1975 г.; М. А. Холмянский и др., 1973 г.; В. С. Якупов,

1968 г.). В большинстве случаев удается решить задачу с обычной для электроразведки погрешностью.

В неблагоприятных геоэлектрических условиях можно применять МПВ (Б. М. Седов, 1974 г.). Рыхлый покров, вне зависимости от его литологического состава и мерзлотных условий, отличается более низкой скоростью упругих волн v (в 1,5—2 раза) по сравнению со скоростью v_T в породах скального основания. Это обеспечивает надежное прослеживание изучаемой границы. При малой мощности рыхлых образований (до 20—40 м) погрешность в ее оценке составляет 15—20 %, при значительной — уменьшается до обычных для сейморазведки значений — 4—5 %. Проведение сейморазведки осложняется наличием таликовых зон в рыхлом покрове, разломов в основании и др. При интенсивной трещиноватости скальных пород фиксируется поверхность ненарушенных пород, что несколько завышает глубины.

В условиях резкого изменения рельефа скального основания может использоваться высокоточная гравиметрия. Ее большим достоинством является практически полная независимость результатов от криологических условий. При мощности рыхлых отложений до 60 м погрешность оценки глубин по гравиметрии составляет 20—35 %, при большой мощности — до 20 % (Г. Д. Бабаян и др., 1972 г.).

Выявление и прослеживание погребенных речных долин. До последнего времени решению этой задачи уделялось внимание лишь при поисках и разведке россыпного золота и кассетирита. Вместе с тем глубоковрезанные в коренные породы древние речные долины, как правило обогащенные грубообломочным аллювиальным и флювиогляциальным материалом, могут служить хорошим источником пресных подземных вод. В случае, когда древняя долина врезана в скальное основание, при благоприятном геоэлектрическом разрезе могут быть использованы методы ВЭЗ и ЭП; в неблагоприятных условиях следует привлекать высокоточную гравиметрию и сейморазведку КМПВ; последняя особенно эффективна. Если же древняя долина, заполненная грубообломочными породами, врезана в песчано-глинистые отложения, она может быть выявлена ВЭЗ, ЭП или гравиметрией (Д. С. Вагшаль, 1973 г.).

Литологическое расчленение скальных пород фундамента. Поскольку физические свойства скальных (ненарушенных) пород в криолитозоне мало изменяются по сравнению со свойствами пород вне ее, выбор методов и приемы интерпретации существенно не меняются. Разные модификации электроразведки, гравимагнитные наблюдения и сейморазведка КМПВ (МПВ) — таковы методы исследования. В наибольшей мере используется электроразведка в виде ЭП различными схемами. Широко применяется двухразносное симметричное профилиро-

вание, в котором малые разности нацелены на изучение пород фундамента в мерзлом состоянии, а большие — в талом.

Прослеживание зон разломов и региональной трещиноватости. Решение этой задачи осуществляется обычными приемами электро-, магнито-, реже — сейсморазведки. Наличие мерзлоты вносит, однако, некоторую специфичность в методику интерпретации. При использовании электроразведки решению задачи способствует наличие надразломных таликовых зон, отличающихся резко пониженным сопротивлением ρ . Хорошие результаты дает при пешеходных наблюдениях метод радиокип в сверхдлинноволновом диапазоне, позволяя выделить разного рода разломы при незначительной мощности насосов.

Эффективность использования магниторазведки в области распространения магматических пород при выявлении зон разломов общеизвестна. Кроме того, как показали исследования в Яно-Колымской области, зоны активных разломов, проходящие в осадочных и метаморфических породах, обогащенных сульфидной минерализацией, также фиксируются магниторазведкой в виде узких локальных отрицательных аномалий; за пределами этих разломов наблюдаются плавные положительные аномалии (М. В. Чернюк, 1968 г.).

Сейсморазведка при выявлении зон разломов и региональной трещиноватости обычно применяется при значительной мощности рыхлых образований. Следует иметь в виду, что в скальных массивных породах при замерзании мало изменяется скорость упругих колебаний. Если же эти породы трещиноваты и льдисты, скорость в них больше, чем в аналогичных талых образованиях, т. е. скоростная дифференцированность массивных и трещиноватых пород в мерзлом состоянии становится меньшей, чем в талом состоянии [2]. Тем не менее сейсморазведка КМПВ успешно выявляет зоны трещиноватости и в мерзлом состоянии; причем приемы интерпретации сохраняются обычными.

Оценка мощности трещиноватых пород. Для решения этой задачи необходимо проследить нижнюю и верхнюю границы трещиноватости. Практика показывает, что как в талом, так и в мерзлом состоянии трещиноватые породы по своим геологическим и сейсмогеологическим свойствам мало отличаются от грубообломочного рыхлого покрова. Поэтому при исследовании ВЭЗ или КМПВ мощность их определяется обычно совместно с мощностью последнего. Знание по геологическим данным мощности рыхлого покрова позволяет определить мощность трещиноватых пород. Если же рыхлый покров представлен мощными глинистыми образованиями, количественно задачу решить трудно. Можно лишь качественно, по нечетким перегибам кривых ВЭЗ, либо по характеру эллипсов анизотропии, наблюдаемых в методе КВЭЗ, судить о сравнительных изменениях мощности рассматриваемых образований.

Определение прерывистости и мощности мерзлой толщи пород. Это наиболее важная из задач, стоящих при изучении криолитозоны. Ей посвящено много исследований [2, 34 и др.]. Первая половина задачи сводится к оконтуриванию участков распространения многолетнемерзлых пород¹. Обычно такое решение требуется в области островного распространения мерзлоты. При этом могут использоваться методы ЭП, ВЭЗ, ДЭМП, ВЭЗ-ВП, сейсморазведка и др. Наиболее просто задача решается при изучении песчано-глинистых рыхлых толщ. Резкое увеличение сопротивления ρ и скорости упругих волн v в мерзлых породах по сравнению с талыми позволяет с помощью электроразведки и сейсморазведки эффективно решить задачу.

Оконтуривание многолетнемерзлых пород осуществляется с помощью ЭП или ДЭМП, которые дополняются в отдельных местах пунктами ВЭЗ, служащими для уточнения результатов профилирования. При ЭП используются различные схемы (симметричная, трехэлектродная, по способу двух составляющих и т. п.), причем профилирование желательно осуществлять для двух глубин — малых и больших: при малых глубинах изучается слой сезонного протаивания, при больших — толща мерзлых пород. Картирование многолетнемерзлых пород можно вести на поверхности земли, со льда водоемов [34] и с воздуха [2].

С помощью сейсморазведки, используя продольные, поперечные или релеевские волны, можно надежно отделить рыхлые мерзлые породы от талых. Так, например, скорость продольных волн v_p в первых составляет 3,5—4,3, во вторых — 1,6—1,8 км/с (Б. М. Седов, 1974 г., и др.). Для такого картирования можно использовать как специальные наблюдения (например, МПВ), так и имеющиеся материалы. Например, в условиях Западно-Сибирской низменности по данным МОВ можно выделить площади с мерзлыми и талыми породами, а также участки мозаичного строения (В. А. Гершаник, 1973 г.). Для первых характерны скорости v_p порядка 3,5, вторых — 1,7 км/с, третьих — промежуточного значения. На границе мерзлых и талых пород фиксируются резкие изломы осей синфазности. Видимая частота упругих колебаний на первой площади высокая, на второй — низкая. Площадь мозаичного строения отличается от первых двух высоким фоном помех, частым отсутствием регулярной записи.

Если коренное основание представлено скальными весьма плотными образованиями с незначительной мощностью рыхлого покрова, малоуглубинные исследования становятся неэффективными. Лишь в области распространения магматических

¹ Выявление узких таликовых зон отличается определенной спецификой и рассматривается ниже.

пород по данным радиометрических наблюдений фиксируются максимумы гамма-излучения в зоне таликов и минимумы — над островами многолетнемерзлых пород [3].

Определение мощности многолетнемерзлых пород осуществляется с помощью электро- и сейсморазведки и термометрических наблюдений. Поскольку мощность сезонно-талого слоя обычно незначительная (1,0—1,5), основное внимание уделяется прослеживанию нижней границы мерзлой толщи.

При гидрогеологических исследованиях широко используется метод ВЭЗ, который при незначительной мощности ММП может сочетаться с электропрофилированием. Четкая нижняя граница мерзлой толщи фиксируется тогда, когда она связана с резкими изменениями литологического состава пород. Эффективность электроразведки заметно снижается в условиях глинистых разрезов при температуре от 0 до -1°C . При недостаточной дифференцированности разреза задачу можно решить лишь качественно, выделяя участки сравнительно большой и малой мощности мерзлых пород.

Наличие в разрезе преимущественно массивных пород (траппы, известняки, граниты) накладывает дополнительные условия, необходимые для эффективного решения задачи. Как правило, в этих условиях нижняя граница мерзлых пород прослеживается, если подмерзлотные породы насыщены водами высокой минерализации, так как лишь это обуславливает необходимую дифференцированность геоэлектрического разреза.

В последние годы стали опробовываться методы электроразведки, использующие высокочастотные электромагнитные поля или неустановившиеся процессы становления электрического поля. Особенно интенсивно внедряются эти методы за рубежом, в Канаде и на Аляске. Таковы частотные зондирования (ЧЗ), зондирования становления в ближней зоне (ЗСБЗ), ВЭЗ-ВП и др. Практика подтверждает высокую эффективность этих методов, для которых ни слой сезонного протавивания, ни высокоомная толща ММП не являются помехой.

При использовании сейсморазведки для определения мощности многолетнемерзлых пород приходится сталкиваться с серьезными затруднениями. Проведенные работы еще находятся в стадии эксперимента, причем все исследования до сих пор были связаны с изучением рыхлых пород. Основной помехой для применения МПВ (КМПВ) является неблагоприятное соотношение скоростей, когда высокоскоростные образования мерзлой зоны залегают на низкоскоростных талых породах. Однако могут применяться некоторые косвенные подходы, в частности анализ амплитудных характеристик преломленных волн. Более перспективным является МОВ. Но и здесь имеются существенные затруднения: невыдержанность и шероховатость изучаемой границы, интенсивные помехи, связанные с прямой

и другими волнами при регистрации отраженных волн от малых глубин и др.

Таким образом, определение мощности многолетнемерзлых пород представляет собой достаточно сложную задачу. Эффективно можно решить ее, если учитывать не только данные бурения, каротажа и результаты полевых геофизических работ, но и ряд косвенных признаков. Такой подход особенно удобен на стадии прогнозных и поисковых работ. В настоящее время установлено, что положение нижней границы мерзлых пород определяется многими факторами: величиной теплового потока q_t , возрастом и глубиной залегания фундамента, наличием антиклинальных структур и активных зон разломов, особенностями гидрогеологических условий и др. Привлекая эти сведения, можно повысить достоверность результатов при одновременном разрежении сети наблюдений.

Определение мощности сезонно-талого слоя. При малой мощности этого слоя необходимость в использовании геофизики вообще отпадает. При его увеличении можно привлекать электроразведку (ВЭЗ либо ЭП в сочетании с ВЭЗ), сейсморазведку МПВ. Верхняя граница мерзлых пород по величине сопротивления резко отличается от вышележащих талых пород. Эта же граница уверенно определяется в методе преломленных волн с помощью продольных, поперечных либо обменных волн (В. Я. Пригода и др., 1976 г., Б. М. Седов, 1974 г.). На формирование верхней границы мерзлых пород оказывают влияние многие экзогенные факторы, в частности рельеф местности, тип растительного покрова, гидрографическая сеть, характер снежного покрова и др. Учет их при геофизических построениях позволяет существенно улучшить результаты работ.

Выявление и оконтуривание глубоких и сквозных таликов, определение в них мощности талых пород. Решения этих задач приведены в работах [2, 20 и др.]. Выявление и глубинная разведка таликовых зон производятся с помощью ЭП, ВЭЗ, ДЭМП и сейсморазведки КМПВ (МПВ). Задача эта, с точки зрения площадного изучения участка, аналогична рассмотренному картированию многолетнемерзлых пород. Особенность заключается в изучении узких таликовых зон. Их выявление и прослеживание достаточно эффективно осуществляются путем корреляции минимумов сопротивления с помощью двухгоризонтного ЭП и ДЭМП, дополняемых небольшим объемом ВЭЗ. При залегании скальных пород на небольшой глубине для выявления таликовых зон необходимо изучать разрывную тектонику (см. выше). Часто сквозные талики располагаются над зонами разломов, по которым циркулируют подземные воды, несущие вверх поток тепла. При пересечении сейсмопрофилями таликовых зон фиксируются характерные признаки, типичные для талых пород (снижение скорости упругих волн, быстрое их затухание и т. п.).

Более сложной является задача определения вертикальной мощности талых пород в таликовых зонах. Если талик достаточно широкий и проходит в рыхлых образованиях, мощность пород при несквозном характере талика достаточно просто находится методом ВЭЗ или МПВ (КМПВ). Для узких таликов возможна лишь качественная оценка их мощности. Форма таликов в вертикальном разрезе может быть очень сложной, когда плоскость контакта талых и мерзлых пород падает на разных участках под разными углами. Рассматриваемая граница раздела может быть достаточно хорошо изучена методом ВЭЗ при очень детальном шаге наблюдений. Видимо, и КМПВ может дать удовлетворительные результаты.

Районирование мерзлых пород по характеру их льдистости. Эта задача обычно решается с помощью ВЭЗ, причем только в условиях терригенного разреза. Ее решению способствует резкое различие в электрическом сопротивлении пород различной льдистости. Например, для моренных суглинков одного из районов Арктики устанавливается четкая корреляционная зависимость (М. А. Холмянский, 1973 г.).

$$L_b = a \lg \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где L_b — льдистость в долях единицы; ρ — сопротивление ММП при льдистости L_b ; ρ_0 — сопротивление тех же пород при $L_b = 0$. В межгорных бассейнах Забайкальского типа грубообломочные рыхлые мерзлые породы повышенной льдистости обладают сопротивлением от 500—1000 до 40 000—100 000 Ом·м, залегающие под ними те же породы с незначительной льдистостью имеют сопротивление, меняющееся от 100—200 до 1000—20 000 Ом·м, т. е. на порядок ниже (А. Е. Бахлов, 1973 г., О. Я. Пеннер, 1962 г., Ю. П. Скляровский, 1970—1974 гг., и др.). Не ясно, с какой точностью удастся проследить на глубине границу между высокольдистыми и менее льдистыми породами, поскольку нет четких геологических критериев при ее проведении.

Высокая эффективность при решении рассматриваемой задачи отмечается при использовании сейсморазведки [2]. В зависимости от условий и густоты сети наблюдений оценку льдистости можно дать либо качественную, либо даже количественную. Такие исследования целесообразно вести лишь на разведочном этапе работы.

Литологическое расчленение рыхлых мерзлых пород. Осуществляется методами ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, КМПВ [2, 8, 34 и др.]. Как показали исследования последних лет, метод ВЭЗ-ВП позволяет зачастую расчленить мерзлые породы тогда, когда по ВЭЗ это выполнить трудно. В частности, методом ВЭЗ-ВП можно выделить мерзлые горизонты песков среди глин (при благоприятном соотношении мощностей). Еще более надежные ре-

зультаты дает КМПВ. Если в талом состоянии скорости в песках и глинах почти не различаются, в мерзлом состоянии разница становится заметной (у песков $v_p=4,6$ км/с, у глин $v_p=2,9$ км/с). Таким образом, по КМПВ можно хорошо проследить подошву мерзлых глин, залегающих на песчаниках.

Разного рода ограничения, предъявляемые к перечисленным методам, заставляют придти к выводу, что в реальных условиях целесообразно для решения поставленной задачи пользоваться комплексом нескольких методов.

Определение положения уровня грунтовых вод. В таликовых зонах задача решается обычными приемами. Наибольший эффект дает метод преломленных волн. При интерпретации представляется возможным разделить преломленные волны, образованные поверхностью ММП и зеркалом грунтовых вод. Как отмечает Н. Н. Горяинов [8], наличие поперечной (обменной PSP) волны, повышенные скорость и частота преломленных волн, криволинейность их годографов являются основными критериями для отличия кровли многолетнемерзлых пород от уровня грунтовых вод.

Сравнительная оценка водоносности рыхлых и трещиноватых талых пород. При изучении водоносности талых пород различного состава в условиях криолитозоны можно использовать все приемы интерпретации, которые рассмотрены в разделах 3, 4. Вместе с тем возможно применение и некоторых дополнительных приемов, связанных со спецификой рассматриваемой зоны. По мнению В. С. Якупова [41], «В благоприятной обстановке (достаточно мощный литологический однородный водоносный комплекс) можно оценить отношение удельных сопротивлений мерзлых и талых горных пород ρ_m/ρ_t . Чем оно больше, тем выше процент крупных пор, т. е. тем больше потенциальная водообильность горизонта. Если данное отношение больше типичного для данных пород, это указывает на повышенную минерализацию подмерзлотных вод... Если $\rho_m/\rho_t \approx 1$, то данный участок для поисков подмерзлотных вод бесперспективен из-за низких коллекторских свойств». По-видимому, это положение следует распространить и на изучение фильтрационных свойств крупных глубоких и сквозных таликов; аналогичные заключения можно сделать и при анализе скоростного разреза. Совместное же использование данных электро- и сейсморазведки должно дать однозначное заключение.

Установление гидравлической связи подземных вод таликовых зон с атмосферными осадками и поверхностными водами. Решение этой задачи достаточно сложно и может быть достигнуто на основе как малоглубинных наблюдений с исследованием полей, непосредственно обусловленных движением подземных вод, так и глубинного изучения структурных условий территории. Кроме того, существенную помощь может оказать решение всех рассмотренных выше задач.

Применение метода ЕП позволяет в условиях таликовых зон установить по знаку аномалии направление движения воды (вверх или вниз) [23]. В других случаях обнаружение подземной наледи позволяет сделать заключение о выходе поблизости мощного подземного источника. Более эффективны исследования в зоне водоемов, где, применяя методы ЕП, резистивиметрию и термометрию, можно легко обнаружить участки субаквальной разгрузки подземных вод [23].

В условиях прерывистой мерзлоты области питания зачастую располагаются на водораздельных участках. Обнаружение с помощью электроразведки (ВЭЗ, ВП) обширных площадей отсутствия мерзлых пород при наличии хорошо фильтрующих отложений в зоне аэрации прямо указывает на возможность существования области питания. Дополнительные исследования методом ЕП при благоприятных условиях могут уточнить решение.

Выявление зон скрытой разгрузки глубоких напорных вод может быть реализовано с помощью глубинной геофизической разведки с применением структурных построений. Обнаружение крупных зон разломов, участков сокращений мощности региональных водоупоров, локальных положительных структур и т. п. — все это способствует косвенному изучению глубинной гидродинамики. В качестве примера укажем на исследования В. И. Поспеева (1971 г.), проследившего с помощью методов электро- и сейсморазведки в южной части Сибирской платформы многочисленные крупные зоны разломов, по которым идет разгрузка подземных вод глубоких водоносных горизонтов. Зоны разломов хорошо увязываются с положением восходящих источников в долинах рек.

Оценка минерализации подземных вод в таликах и подмерзлотных породах. В условиях мерзлой зоны, как и в гумидной и аридной зонах, минерализация подземных вод может быть изучена по непосредственным наблюдениям на участках разгрузки, по изменениям физических свойств пород в связи с воздействием на них различной степени минерализованных подземных вод и по ряду косвенных (в основном структурных) признаков.

В криолитозоне поверхностные воды характеризуются обычно весьма низкой минерализацией. Это зачастую ультрапресные воды. Вниз по течению рек и ручьев за счет выщелачивания из пород растворимых солей минерализация воды постепенно увеличивается, одновременно падает ее сопротивляемость. Так, сопротивление воды горных рек Забайкалья и Северо-Востока СССР варьирует от 200 до 300 Ом·м (В. А. Сазонов, 1964 г.), крупных рек Сибири — от 30 до 90 Ом·м (В. И. Жигунов, 1959 г.). Области разгрузки подземных вод, отличающиеся несколько повышенной минерализацией, чрезвычайно четко фиксируются резистивиметрией. Например, выходы ис-

точников с минерализованной водой в русле р. Лены отмечаются снижением ρ_0 речной воды до 8—11 Ом·м. Таким образом, резистивиметрические наблюдения могут дать ценный материал при изучении минерализации подземных вод. Обилие водотоков и водоемов и низкая минерализация поверхностных вод благоприятствуют решению задачи.

Электрическое сопротивление талых пород, которые исследуются в зоне таликов и под толщей многолетнемерзлых пород, подчиняется тем же законам, которые были рассмотрены для рыхлых и скальных пород. Некоторой особенностью является лишь низкая температура пород, что способствует их более низкому сопротивлению ρ в сравнении с ρ тех же пород в более южных районах страны. Так, по данным Т. Я. Карпенко (1976 г.), песчаные отложения таликовых зон Центральной Якутии при температуре около 0°C и пористости в 35—42 % характеризуются сопротивлением, меняющимся от 70—80 до 20—25 Ом·м, при минерализации, варьирующей от 0,5 до 3,0 г/л. При этой же минерализации аналогичные породы южных районов имеют сопротивление примерно вдвое ниже (см. рис. 10).

Минерализованные подземные воды, насыщающие скальные породы, также резко снижают их сопротивление ρ . Например, кембрийские известняки Сибирской платформы, имеющие сопротивление ρ при насыщении пресными водами, измеряемое сотнями и тысячами ом-метров, при замене этих вод высокоминерализованными растворами приобретают сопротивление в несколько десятков ом-метров.

В ряде случаев оценку минерализации подземных вод можно сделать на основе сравнения электрического сопротивления талых ρ_T и сопротивления аналогичных мерзлых пород ρ_M . Особенно резко меняется ρ пород вблизи морского побережья, где соленая вода вытесняет пресную. Здесь по данным В. С. Якупова (1968 г.), В. А. Кириллова (1977 г.) М. Я. Холмянского

Т а б л и ц а 16

Порода	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м			
	Породы, насыщенные пресной водой		Породы, насыщенные соленой водой	
	талые	мерзлые	талые	мерзлые
Рыхлые породы	100—1000	1000—1 000 000	10—100	200—500
Скальные породы				
песчано-сланцевые образования складчатого основания	100—500	500—3000	10—40	100л
гранитоиды Mz	500—300	1000—10 000 и более	100л	100л

(1971 г.) и др. установлены следующие интервалы изменений р (табл. 16). Таким образом, скальные породы, насыщенные соленой водой, в мерзлом состоянии увеличивают свое сопротивление примерно на порядок, в то время как рыхлые образования — на 2—3 порядка.

5.2. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ ТАЛИКОВЫХ ЗОН РЕЧНЫХ ДОЛИН, ПОДОЗЕРНЫХ И ПОДАЛАСНЫХ ТАЛИКОВ

Месторождения указанного типа приурочены к отложениям преимущественно рыхлого состава. Их можно подразделить на два подтипа: а) месторождения таликовых зон речных долин и б) месторождения подоцерных и подаласных таликов.

Месторождения таликовых зон речных долин. Эти месторождения имеют широкое распространение и используются для крупного и децентрализованного водоснабжения. Среди них можно выделить три разновидности (табл. 17). Первая разновидность месторождений широко распространена на площади Сибирской платформы. Для них характерна чрезвычайно геоэлектрическая неоднородность. Часто в коренных породах вдоль зон разломов циркулируют высокоминерализованные воды, разгружающиеся в аллювиальные отложения.

Вторая разновидность месторождений наиболее полно представлена на площади артезианских бассейнов платформенного типа. Поскольку современный аллювий сложен тонкообломочными слабоводообильными породами, особый интерес представляет выявление здесь древних погребенных долин. Месторождения третьей разновидности распространены в узких долинах рек горно-складчатых районов. Важной особенностью их является часто наблюдающаяся гидравлическая связь подземных

Таблица 17

Рельеф местности	Мощность рыхлых отложений	Скальные породы основания	Основные районы распространения
Равнина	Незначительная	Известняки, траппы	Сибирская платформа, краевая часть Западно-Сибирской низменности
Равнина	Значительная	Скальные породы на практически недоступной глубине	Западно-Сибирская, Виллюйская и Приморская низменности, межгорные впадины Забайкалья и Дальнего Востока
Горная местность	Незначительная	Магматические и метаморфические образования	Северный Урал, Алданский щит, Забайкалье, Колымо-Чукотская область и др.

вод таликов с трещинно-жильными водами зон разломов, проходящих в коренных породах.

При изучении рассматриваемых месторождений геофизические методы используются в основном при детальном поисках. На этом этапе требуется выявить и проследить глубокие и сквозные талики, оценить мощность многолетнемерзлых пород и пород рыхлого покрова (если фундамент залегает на доступной глубине), выявить древние погребенные долины. Методы исследований — ЭП и ВЭЗ, причем от сложности геоэлектрической обстановки зависит, какой из них будет основным. При наличии глубокомерзлых погребенных долин, когда метод ВЭЗ недостаточно эффективен для их выявления, следует включить в комплекс гравиметрические наблюдения, а в особо трудных случаях — сейсморазведку КМПВ по ограниченному числу профилей.

На стадии предварительной разведки, которая при изучении сравнительно малых объектов ведется неразрывно с поисками, уточняются решения, полученные на предыдущей стадии, и одновременно ставятся новые задачи, ориентированные на изучение геокриологических и гидрогеологических условий (см. раздел 5.1). В зависимости от того, какая разновидность месторождений изучается и какие конкретные геологическо-гидрогеологические условия имеют место, делается акцент на более узкий круг задач. Например, оценка мощности и состава пород, перекрывающих мерзлые толщи, особенно тщательно производится в непосредственной близости от таликовых зон. Делается это в связи с возможностью дополнительного привлечения запасов надмерзлотных вод в летний период при эксплуатации основных горизонтов таликовых зон. Иногда на площади таликов сверху образуется слой мерзлых пород небольшой мощности, так называемый «kozyрек». Определение его мощности позволяет выявить истинные размеры талика. Гидрогеологическая связь грунтовых и напорных вод в зоне таликов изучается главным образом путем исследования их разреза. В ряде случаев талики могут быть достаточно глубокие, но не сквозные. С другой стороны, под водоносным горизонтом, вмещающим грунтовые воды таликовой зоны, иногда залегают глинистые породы. В обоих случаях гидравлическая связь грунтовых и напорных вод затруднена или исключается. Если напорные воды пресные, желательно выявить талики, где имеет место активная гидравлическая связь грунтовых и напорных вод. При предварительной разведке можно использовать методы ВЭЗ, ЭП, ЕП, дополняемые в условиях слабодифференцированного разреза методом ВЭЗ-ВП, а при необходимости изучения коренного основания — магниторазведкой и в особо трудных условиях — методом КМПВ.

При детальной и эксплуатационной разведке полевые геофизические методы могут использоваться при проведении

режимных наблюдений¹, в частности для изучения растепления пород в районе действующего водозабора.

Площадь полевых геофизических исследований при поисках варьирует от 5—10 до 50—100 км² и при предварительной разведке обычно составляет несколько квадратных километров. В значительной мере площадь съемки зависит от ширины речной долины. Глубина разведки, как правило, не превышает 50—100 м. Разносы AB_{\max} зондирований составляют 1—1,5 км; разносы AB при ЭП не превышают несколько сотен метров.

Вопрос о сети наблюдений при поисках и разведке месторождений подземных вод в условиях Севера разработан еще не достаточно. Имеются данные, свидетельствующие о целесообразности ведения поисково-разведочных геофизических работ по сети поперечных профилей, нормальных к направлению речной долины. В условиях узких долин (шириною примерно до 1—2 км) расстояние между геофизическими профилями должно составлять при поисках примерно 200—500 м, при предварительной разведке 50—100 м, иногда 200. При изучении широких долин расстояние между профилями может быть увеличено соответственно в 2—3 раза. Ширина речных таликов колеблется от нескольких десятков до 300—500 м. В соответствии с этим шаг наблюдений при ЭП варьирует от 10 до 50 м. При магнито- и гравиразведке он составляет 25—50, реже 100 м. В случаях, когда метод ВЭЗ является вспомогательным, направленным главным образом для расшифровки данных ЭП, его используют в объеме, составляющем не более 3—5 % от общего числа точек ЭП. Пункты ВЭЗ располагают в отдельных наиболее интересных местах, часто не на каждом профиле. Когда же ВЭЗ является основным методом, его выполняют по системе указанных поперечников при расстоянии между пунктами наблюдений от 50—100 до 200 м, редко более. На основе геофизической съемки результативный масштаб гидрогеологических построений при поисках 1:25 000—1:50 000, иногда мельче, при предварительной разведке — 1:10 000—1:25 000.

Рассмотрим примеры геофизических работ при изучении месторождений подземных вод рассматриваемого подтипа.

В 1976 г. Иркутским ТГУ на левом берегу р. Киренги проводились поисково-разведочные работы для хозяйственно-питьевого водоснабжения (рис. 18). Изучался водоносный горизонт, приуроченный к валунно-галечниковым современным аллювиальным отложениям. Мощность четвертичных образований на участке достигает нескольких десятков метров, а водоносных пород современного аллювия — до 28 м. Водоносны они лишь в пределах узкой прирусловой полосы. Ближе к склону долины

¹ Аналогичное положение складывается при изучении других типов месторождений криолитозоны. В дальнейшем этот вопрос не затрагивается.

развиты ММП с отдельными таликами. Ниже залегают неогеновые и кембрийские образования. Первые представлены замороженными глинами и суглинками и являются водоупорными. Также служат водоупором слабопроницаемые алевролиты, аргиллиты илгинской ($\epsilon_3 il$) и верховицкой ($\epsilon_3 vl$) свит общей мощностью до 500 м. Еще ниже залегают трещиноватые кавернозные доломиты и известняки литвицкой ($\epsilon_{2-3} lt$) и ангарской ($\epsilon_1 an$) свит суммарной мощностью около 200 м. Водообильность этих пород в целом невысокая, минерализация подземных вод — до 0,6 г/л. В местах выхода отложений ангарской свиты в антиклинальных структурах и тектонически ослабленных зонах водообильность пород резко увеличивается, а минерализация местами достигает 140 г/л. Подземные воды ангарской свиты разгружаются под четвертичными отложениями.

Перед геофизическими работами, выполненными под руководством Г. Л. Лавриновой, были поставлены следующие задачи: оценить мощность аллювиально-делювиальных отложений, провести картирование тектонических нарушений в карбонатных породах ϵ_1 , определить участки распространения минерализованных вод, оконтурить многолетнемерзлые породы. Задачи решались методами ВЭЗ и ЭП. Геофизические работы проведены по системе параллельных профилей, отстоящих друг от друга на 200 м и ориентированных вкост предполагаемых геологических структур. ВЭЗ выполнены с $AB_{max}=1000$ м и шагом наблюдений 200 м, ЭП проведено по системе двухгоризонтных наблюдений с $AB=130$ и $A'B'=80$ м при шаге наблюдений 20 м. Изученная площадь — 4 км². Отчетный масштаб исследований 1 : 10 000.

По данным ВЭЗ и каротажа установлен четырехслойный геоэлектрический разрез типа КН: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 \rightarrow \infty$. Горизонт, имеющий сопротивление ρ_1 — это почвенный слой — супеси, суглинки, торф, его мощность $h_1=0,1 \div 3$ м, $\rho_1=10 \div 70$ Ом·м; на участках распространения мерзлых толщ этому горизонту соответствует слой сезонно-талых пород. Горизонт с сопротивлением ρ_2 представлен разнообразными галечниковыми образованиями и многолетнемерзлыми породами. Сопротивление пород ρ_2 резко меняется в зависимости от температурного режима, минерализации подземных вод, объемной влажности и глинистости пород: сухие валунно-галечниковые отложения имеют сопротивление $\rho_2' = 700 \div 2000$ Ом·м; те же породы водоносные (талые) имеют $\rho_2'' = 40 \div 800$ Ом·м; сопротивление аналогичных пород с глинистым заполнителем, $\rho_2''' = 40 \div 800$ Ом·м. При каротаже иногда можно расчленить разрез на отмеченные выше три горизонта, но при зондированиях они выделяются совместно в виде одной толщи, имеющей

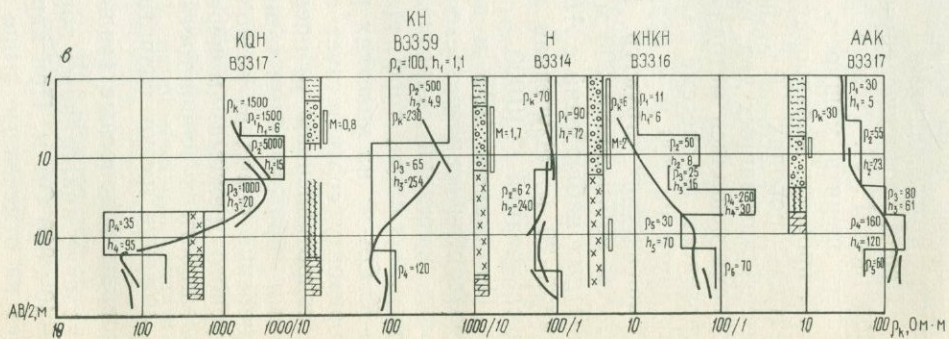
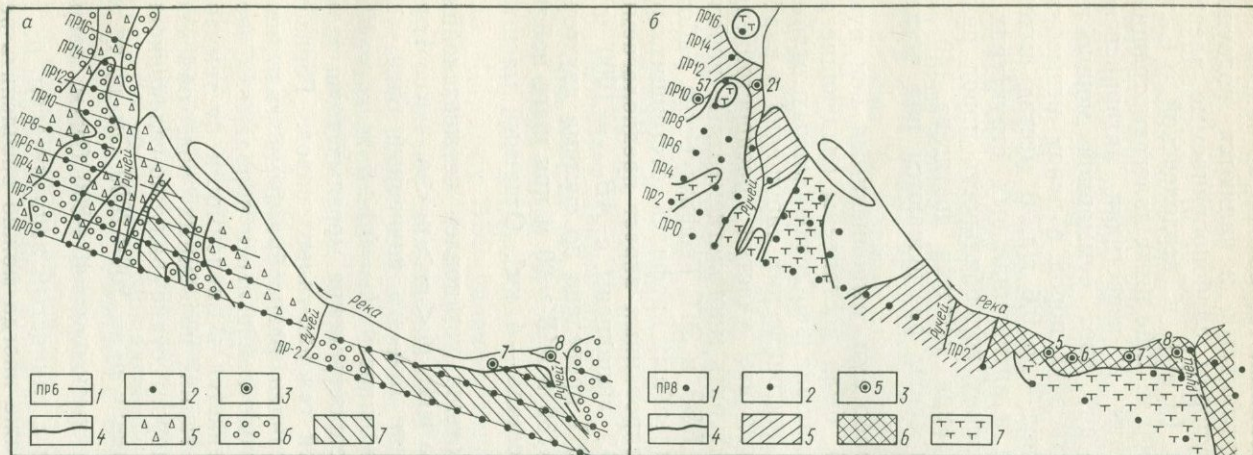
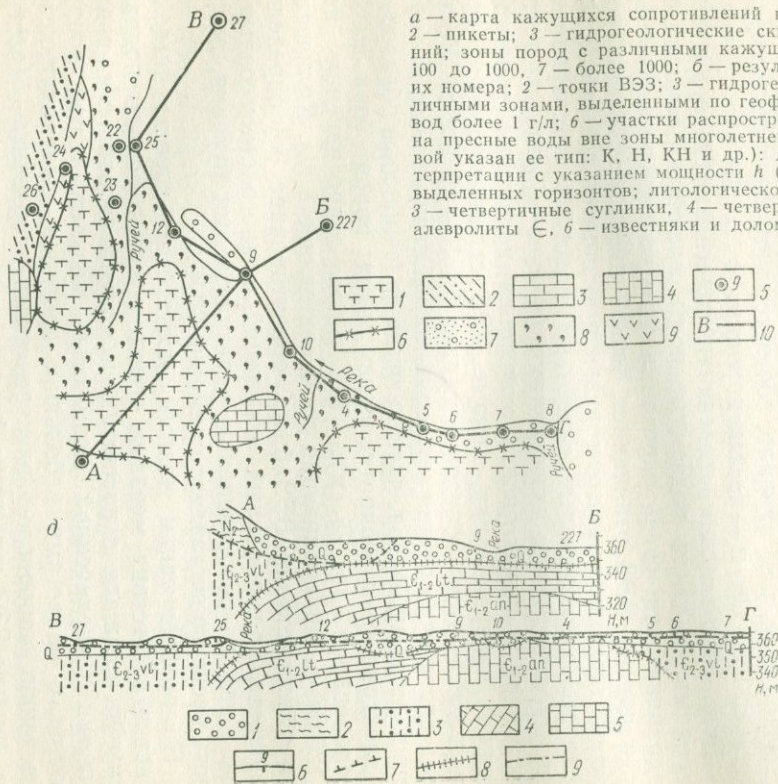


Рис. 18. Результаты поисково-разведочных геофизических работ на пресные воды в западной части трассы БАМ (по данным Г. Л. Лавриновой, 1977 г.).



сопротивление 40—6000 Ом·м. Эти же породы в мерзлом состоянии фиксируются как единый высокоомный горизонт с сопротивлением, меняющимся от 500 до 10 000 Ом·м, причем при температуре пород от 0 до $-0,5^{\circ}\text{C}$ сопротивление составляет 500—2000 Ом·м, а при температуре от $-0,5$ до -2°C — 3000—10 000 Ом·м. Нижележащий горизонт имеет сопротивление ρ_3 , изменяющееся от 10 до 110 Ом·м. Он объединяет терригенные породы $\epsilon_{3\text{vl}}$ и трещиноватые, кавернозные породы $\epsilon_{2-3\text{lt}} - \epsilon_{\text{ап}}$, насыщенные водой повышенной минерализации. Опорный горизонт ($\rho_4 \rightarrow \infty$) представлен массивными карбонатно-галогенными породами $\epsilon_{1\text{il}}$. При постановке ВЭЗ не всегда фиксируются кривые только вида КН, могут быть и другие (КНКН, АКQN и т. п.) в зависимости от соотношения мощности и сопротивления горизонтов.

Качественная интерпретация кривых ВЭЗ и графиков ρ_K электропрофилеирования сводилась к районированию территории по типам геоэлектрических разрезов, оконтуриванию участков многолетнемерзлых и талых пород и выделению площадей с пресными и минерализованными подземными водами. Установлено, что на картах ρ_K зоны с сопротивлением $\rho_K \geq 1000$ Ом·м, как правило, соответствуют многолетнемерзлым, а с $\rho_K \leq 1000$ Ом·м — талым породам.

Если аллювиальные галечники подстилаются терригенными породами $\epsilon_{3\text{vl}}$, то подземные воды аллювия имеют тесную гидравлическую связь с рекой и низкую минерализацию; при этом кривые ВЭЗ отличаются четкой дифференцированностью, а сопротивление третьего горизонта ρ_3 обычно выше 100 Ом·м. Если же аллювиальные галечники подстилаются трещиноватыми доломитами и известняками ($\epsilon_{2-3\text{lt}} - \epsilon_{1\text{ап}}$), из которых поступают в четвертичные отложения подземные воды повышенной минерализации, кривые ВЭЗ сглаживаются, а сопротивление ρ_3 этого горизонта падает до 10—40 Ом·м. Установлена достаточно четкая корреляционная связь между минерализацией подземных вод, насыщающих галечниковые образования, и электрическим сопротивлением этих пород (при глубине исследований до 25 м). Так, при сопротивлении пород в 120 Ом·м минерализация воды составляет 1 г/л. Качественная интерпретация ВЭЗ была ориентирована на определение мощности аллювиальных отложений и многолетнемерзлых пород. Судя по сопоставлению с результатами бурения, погрешность расчетов составляет примерно 30 %.

По геофизическим данным достаточно хорошо выделены участки отсутствия мерзлых пород, а талые породы подразделены на площади с пресными и минерализованными водами. Участки с увеличенной мощностью мерзлых пород коррелируются с областями небольших прогибов, выделяющихся по поведению опорного электрического горизонта ($\rho_4 \rightarrow \infty$). По кривым ВЭЗ намечены блоки с различным сопротивлением

карбонатных пород (ρ_4), что, видимо, связано с тектонической трещиноватостью в сводах антиклиналей. Таким образом, данные электроразведки позволили выделить перспективные на пресные воды участки, и это подтверждено результатами бурения. В целом рассмотренные работы могут служить хорошим примером использования геофизики при решении задач, связанных с децентрализованным водоснабжением. При поисково-разведочных работах в аналогичных условиях, но для крупного водоснабжения, требуется расширение площади исследования; по-видимому, при этом целесообразно привлечение сейсморазведки КМПВ (МПВ) для надежного прослеживания зон разломов в кембрийских образованиях, а также метода ВЭЗ-ВП для более дифференцированного расчленения мерзлых толщ по литологическому и криогенному признакам.

Аналогичные исследования с большим эффектом проведены в бассейне р. Колымы (В. А. Кириллов и др., 1977 г.) и в Норильском районе (С. М. Иогин, 1970 г.) по изучению древних русел.

В качестве примера изучения таликовых вод речной долины в горном районе рассмотрим исследования, проведенные Читинским ТГУ, в долинах рек Наминга и Нижний Ингамакит в Забайкалье в связи с необходимостью обеспечения пресной водой горно-обогатительного комбината (Б. Д. Любалин, О. Я. Пеннер, В. Н. Самойленко и др., 1962—1975 гг.). Основная задача геофизических исследований сводилась к выявлению и прослеживанию таликовых зон; кроме того, оценивалась мощность рыхлых отложений долины и изучалась разломная тектоника. Масштаб съемки при поисках составлял 1:25 000, при разведке — 1:10 000. Методы исследований — ВЭЗ и ЭП, дополненные при разведке магнитометрией, ориентированной на изучение тектоники фундамента. ВЭЗ выполнялись с разносами AB_{\max} до 1,0—1,5 км, ЭП — симметричной установкой с $AB=100$ м. Сеть наблюдений по методу ВЭЗ — $400 \times 1000 \times 100$ —300 м, электропрофилеирования при поисках $250 \times 500 \times 50$, при разведке — 200×20 м, магниторазведочных наблюдений — 100×10 м. Используемая методика в целом обеспечила решение поставленных задач. Однако возможности геофизических методов, особенно на стадии разведки, далеко не исчерпаны. Детальное исследование литологического состава мерзлых и талых рыхлых пород с элементами прогноза фильтрационных свойств последних, подробное изучение трещиноватости и разломной тектоники пород фундамента, выявление гидравлической связи подземных вод, циркулирующих в рыхлых и трещиноватых массивных породах — вот те задачи, которые целесообразно было бы решать геофизическими методами. Для этого необходимо, естественно, расширить комплекс геофизических наблюдений.

Месторождения подозерных и подаласных таликов. Начиная с середины 60-х годов в Вилюйском и других артезиан-

ских бассейнах выполняется большой объем геофизических работ с целью поисков и разведки месторождений пресных вод приуроченных к подозерным и термокарстовым (аласным) таликовым зонам. Этот тип месторождений используется для децентрализованного водоснабжения.

Рассмотрим методику разведки месторождений на примере Центральной Якутии. Изучаемые отложения по возрасту относятся к четвертичным неогеновым и меловым образованиям. По составу это достаточно однородные преимущественно песчаные породы. Описываемый регион отличается значительной мощностью ММП — от 300 до 600 м. Мощность таликовых зон варьирует от 60 до 280 м, имеются и сквозные талики. Ширина таликовых зон изменяется от первых сотен метров до первых километров, а площадь их — от 1—2 до 20 км². Таликовая зона зачастую перекрыта мерзлыми породами (так называемым «kozyрьком») мощностью от 3—5 до 20—30 м. Минерализация таликовых вод варьирует от 0,2—0,4 до 2—3 г/л.

В задачи геофизических исследований входят выявление и оконтуривание по площади таликовых зон, определение мощности талых пород (в зоне талика) и перекрывающих их мерзлых пород; в последнее время в опытным порядке дается оценка минерализации подземных вод. Используется ВЭЗ с $AB_{\max} = 1 \div 2$ км и двухгоризонтное ЭП с $AB = 100 \div 200$ м и $A'B' = 20 \div 30$ м. Электроразведка сопровождается электро- и термокаротажем скважин. При поисках таликовых вод используются ландшафтные методы, что позволяет резко сузить объем геофизических работ, ориентируя их на ограниченное число участков с примерно известными контурами. Результаты зондирований позволяют сделать вывод о наличии талика. Применяя ЭП, уточняют контуры таликовой зоны; одновременно, используя малые разносы AB , выделяют участки, где распространены «kozyрьки». Профили ЭП проводятся с шагом 25—50 м. При вытянутых таликовых зонах профили отрабатываются в виде поперечников, отстоящих друг от друга на 250—500 м; иногда вдоль талика дополнительно прокладывается продольный профиль. Для изучения малых изометричных таликовых зон проходятся два взаимно перпендикулярных профиля. По данным ЭП задаются точки ВЭЗ с целью решения остальных задач. Расстояние между ВЭЗ равно 0,5—1 км. Количество точек ВЭЗ по отношению к количеству точек ЭП составляет в среднем около 2—3 %. Результативный масштаб исследований может быть оценен как 1 : 10 000—1 : 25 000. Средняя площадь участка составляет 10—15 км²; для изучения одного участка требуется 15—20 км ЭП и 10—15 физических точек ВЭЗ.

Следует отметить в целом благоприятные геофизические условия для решения поставленных задач. Обычно сопротивление талых песчано-глинистых пород составляет 30—90 и, как правило, не выше 150 Ом·м, в то время как мерзлых — от 150

до 1500—5000 Ом·м. Сопrotивление мерзлых пород зависит от большого числа факторов; дать их физико-геологическую характеристику только по величине сопротивления невозможно — необходимо изучать другие геофизические параметры (скорость упругих волн, поляризуемость и т. п.).

Интерпретация графиков ЭП элементарно проста: высокие значения ρ_k и изрезанная конфигурация графика при больших разносах ($AB=100-200$ м) характеризуют мерзлые породы большой мощности, низкие значения ρ_k при достаточной их стабильности — талые породы тоже большой мощности. Если при малых разносах ($A'B'=30$ м) значения ρ_k низкие, то «kozyрек» отсутствует, и наоборот. Интерпретация кривых ВЭЗ более сложна. В зоне таликов при наличии «kozyрька» фиксируются кривые типа КН, К, QH. Если «kozyрька» нет, наблюдаются слабоволнистые кривые при почти стабильном значении ρ_k . В зоне распространения мощных толщ ММП отмечаются кривые А, АК, К, КАН и др. (при выбранных разносах AB_{max}). Если таликовая зона замкнутая и достаточно широкая, конечная асимптота кривой ВЭЗ идет под углом 45° к оси абсцисс, фиксируя нижний мерзлый слой в виде горизонта бесконечного сопротивления. Если наблюдения проводятся со льда (при изучении подозерных таликовых зон), используются донные ВЭЗ и применяются специальные приемы интерпретации. Точность количественной интерпретации ВЭЗ, выполненной с помощью обычных трехслойных палеток, как показало сопоставление со многими скважинами, вполне удовлетворительная. Так, при мощности талых пород 100—150 м погрешность составляет 6—15%. Точность определения мощности «kozyрька» толщиной 9—10 м составляет 30—40%.

Остановимся на результатах опытных работ по применению метода ВЭЗ-ВП. Исследования выполнены А. П. Потаповым и др. в Усть-Алданском районе. По кривым ВЭЗ-ВП приближенно установлены глубины, где может быть встречен в талых породах водоносный горизонт. Эти результаты сопоставлены с данными бурения. Действительно, в крупнозернистых песчаниках и галечниках отмечается быстрый спад величины ВП, а в мелкозернистых фракциях — замедленный. Намечается также определенная связь между величинами $\eta_k(\%)$ и минерализацией подземных вод M (г/л); при $\eta_k=0,8 \div 1,5$ $M=1,0$; при $\eta_k=0,3 \div 0,4$ $M=1,5 \div 2,5$. Мерзлые породы отличаются минимальными значениями η_k . Опытные работы В. А. Пугача и др. также подтверждают определенную перспективность использования методов ВЭЗ-ВП при поисках и разведке подземных вод в криолитозоне.

В заключение приведем пример поисково-разведочных работ при изучении одного из месторождений подземных вод рассматриваемого подтипа (рис. 19).

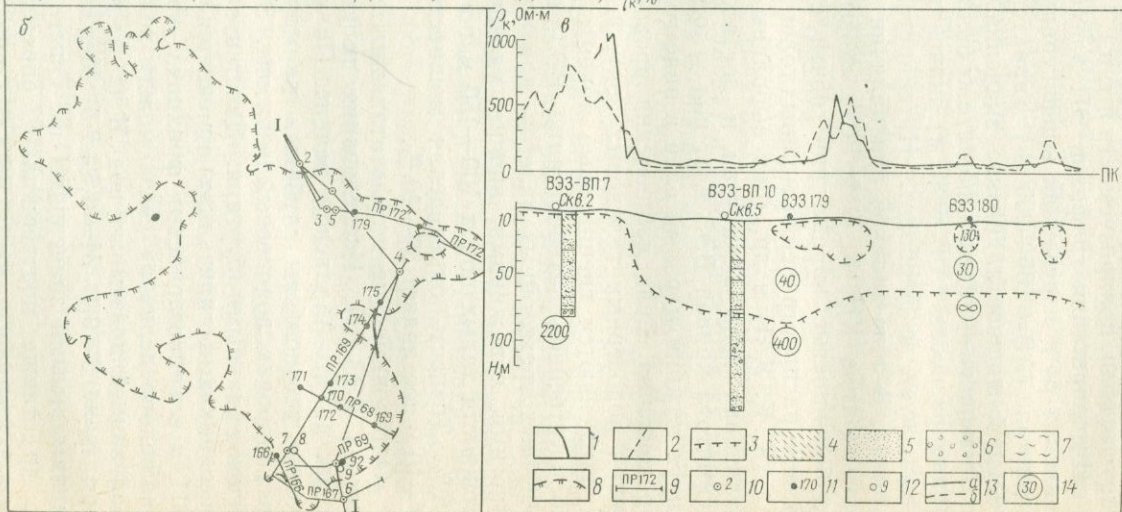
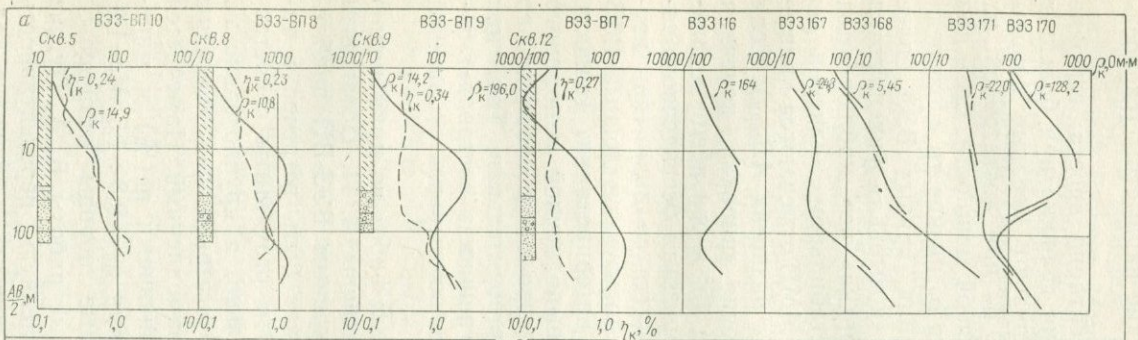


Рис. 19. Результаты геофизических работ на участке Борогоны при поисках и разведке подземных вод таликовых зон (по данным А. П. Потапова и др., 1977 г.).

a — графики кривых ВЭЗ и ВЭЗ-ВП, *б* — план электроразведочных работ, *в* — разрез по профилю 172; графики кривых в билогарифмическом масштабе: 1 — ВЭЗ, 2 — ВП; 3 — граница мерзлых пород по разрезу скважин; 4 — сульфиды; 5 — песок; 6 — глина; 7 — глина; 8 — граница распространения талых пород на плане; 9 — линии электропрофилей и их номера; 10 — буровые скважины; 11 — пункты ВЭЗ и их номера; 12 — пункты ВЭЗ-ВП, 13 — графики ЭП; *a* — при АВ = 200 м, *б* — при АВ = 30 м; 14 — сопоставление пород (в Ом. м) на разрезе

5.3. ПОДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДЫ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ

Среди месторождений подмерзлотных напорных вод в рыхлых отложениях¹ можно выделить три подтипа [28]: 1) месторождения межмерзлотных вод (приурочены к горизонтально-протяженным таликам); 2) месторождения собственно подмерзлотных вод (водоносный горизонт перекрывается непосредственно ММП); 3) месторождения, в которых водоносный горизонт расположен значительно глубже подошвы ММП. Глубина исследований этих месторождений составляет несколько сотен метров.

Месторождения межмерзлотных подземных вод. Межмерзлотные талики отмечены в Печорском, Западно-Сибирском и других артезианских бассейнах. Иногда они отличаются повышенной водообильностью. С помощью ВЭЗ их можно выявить, оценить мощность и глубину залегания в случае, когда мощность таликовых зон соизмерима с мощностью залегающих над ними пород [2 и др.]. Обычно фиксируется слабодифференцированная кривая ВЭЗ типа КНК. Минимум ρ_K в середине крупного пологого максимума ρ_K отмечает талые породы. Чаще всего задача решается качественно. Помимо ВЭЗ, видимо, можно использовать ВЭЗ-ВП (нет практического опыта).

Не исключена возможность, что с помощью сейсморазведки (КМПВ и особенно МОВ) разрешается задача, связанная с выявлением в мерзлой толще среди глинистых пород пологозалегающих водоносных горизонтов — талых песков и рыхлых песчаников. По-видимому, ограничения в минимальной мощности, накладываемые на электроразведку, в меньшей мере касаются сейсмических методов исследований.

Месторождения собственно подмерзлотных вод. Можно выделить две разновидности этих месторождений. Одна из них приурочена к межгорным артезианским бассейнам, заполненным толщей рыхлых отложений, здесь преобладают грубообломочные породы, иногда встречаются эффузивные породы (типа базальтовых покровов) и их пирокластические аналоги. Месторождения подмерзлот-

¹ Аналогичные месторождения в массивных породах из-за отсутствия опыта геофизических исследований нами не рассматриваются.

ных вод этой разновидности широко распространены и разведываются достаточно часто (межгорные впадины Забайкалья, Дальнего Востока и Северо-Востока). Другая разновидность месторождений приурочена к артезианским бассейнам платформенного типа, сложенным мощными терригенными породами (Западно-Сибирский, Вилюйский и другие бассейны). Опыт геофизических исследований этой разновидности значительно меньше.

Месторождения подмерзлотных вод межгорных артезианских бассейнов. Такие месторождения изучаются полевыми геофизическими методами на стадии общих и детальных поисков, иногда при предварительной разведке.

На стадии общих поисков основной задачей геофизических исследований является выявление общих черт тектоники межгорных впадин. Особенно важно установить границы артезианских бассейнов. Иногда в пределах одной межгорной впадины можно выделить два и больше бассейнов. В других случаях две, казалось бы, разобщенные впадины представляют собой единый артезианский бассейн. Задача обычно решается методом ВЭЗ. С большим эффектом может использоваться гравиметрическая съемка в комплексе с магнитометрией и редкой сетью ВЭЗ. Весьма ценный опорный материал дает сейсморазведка КМПВ, профили которой на значительном расстоянии (до 20 км и более) пересекают впадину вдоль и поперек. Все перечисленные исследования зачастую могут быть выполнены камеральным путем на базе имеющихся материалов. Так, например, межгорные впадины Забайкалья хорошо изучены перечисленными методами в связи с поисками угольных, золоторудных и других месторождений.

На стадии детальных поисков полевые геофизические методы нацелены на уточнение тектоники артезианского бассейна, определение мощности рыхлых отложений покрова и мощности ММП, прослеживание таликовых зон. На стадии предварительной разведки уточняются детали геологического строения в пределах выделенных участков, изучаются геокриологические и гидрогеологические условия. В частности, выявляются места разгрузки подземных напорных вод, изучается гидравлическая связь со смежными артезианскими бассейнами (по косвенным структурным признакам), оцениваются состав и водообильность подмерзлотных пород. Для решения перечисленных задач используются ВЭЗ, ЭП, магниторазведка, дополненные методами ЕП и ВЭЗ-ВП (на стадии детальных работ); когда это возможно, привлекаются на стадии поисков материалы ранее выполненных работ по сейсмо- и гравиразведке.

ЭП является важным методом при поисках месторождений рассматриваемого типа. С его помощью решаются геокриологические (зачастую решения качественные, сравнительные) и

некоторые геологические задачи. Как правило, используется двухгоризонтное профилирование по схеме $AA'MNB'B$. Разносы $A'B'$ равны 100—150 м, разносы AB — в 3—5 раз больше. Малые разносы $A'B'$ позволяют выявить таликовые зоны и характеризовать слой сезонного протаивания, большие разносы AB — качественно оценивать мощность многолетнемерзлых пород, судить о том, какие таликовые зоны — слепые или сквозные и т. п. Совместное использование графиков ЭП при малых и больших разносах, а также привлечение данных ВЭЗ способствуют однозначности интерпретации. Шаг наблюдений при ЭП, как правило, равен 50 м. Поскольку ширина таликовых зон зачастую составляет 100—200 м, такой шаг обеспечивает надежное решение основных задач. Электропрофили ориентируются вкост междгорных впадин (когда последние четко выражены в рельефе). Расстояние между ними при детальном поисках варьирует от 1000 до 2000 м, а на более перспективных участках — от 250 до 500 м. Густота наблюдений колеблется от 20 до 80 физических точек на 1 км² в зависимости от стадии работ. Системой профилей полностью покрывается поисковая площадь. Размеры площади меняются от 100 до 600 км². Как правило, изучается вся площадь междгорных впадин; если она значительно вытянута, то часть ее (отдельные муьды, либо крупные блоки, ограниченные разломами). Это необходимо, поскольку в дальнейшем при создании крупного водозабора вся изученная площадь будет вовлечена в его гидродинамическое воздействие.

Метод ВЭЗ используется для уточнения результатов ЭП и решения большинства задач. Разносы AB_{\max} , в зависимости от заданной глубины исследований и особенностей геоэлектрического разреза (наиболее существенно влияет мощность ММП), варьируют от 1—2 до 4—8 км. Обычно ВЭЗ ставятся на отдельных профилях ЭП. В зависимости от размеров междгорных впадин шаг наблюдений колеблется от 0,5 до 1,0 км. Расстояние между профилями, исследованными ВЭЗ на стадии детальном поисков, как правило, от 2 до 5 км; таким образом, густота наблюдений по методу ВЭЗ составляет в среднем 0,5 ф. т./км². На стадии разведки густота наблюдений в несколько раз больше.

Методы естественных и вызванных потенциалов могут использоваться с целью выявления таликовых зон, обнаружения участков разгрузки подземных вод, литологического расчленения разреза мерзлых пород. На практике, однако, малый объем этих исследований, редкая сеть наблюдений (например, для метода ЕП шаг равен 50 м), отсутствие повторных сезонных наблюдений — все это не позволило до сих пор добиться положительных результатов, не дало возможности правильно оценить эффективность методов ЕП и ВП.

В целом эффективность полевых геофизических методов исследований при изучении артезианских бассейнов байкальского и забайкальского типов достаточно высокая. Геофизические методы на поисковой стадии обеспечивают построение результативных карт масштаба примерно 1 : 100 000, при предварительной разведке — 1 : 50 000. В зависимости от конкретных условий возможны отклонения в сторону более мелких или крупных масштабов.

В качестве удачных примеров геофизической разведки подмерзлотных вод можно назвать работы в Верхне-Зейском артезианском бассейне, проведенные под руководством А. А. Огильви (1976 г.), в Ундургинском бассейне — под руководством В. М. Денисова и В. М. Поздеева (1972 г.) и в Верхне-Чарском бассейне — под руководством Ю. П. Складневского (1974 г.).

Месторождения подмерзлотных вод артезианских бассейнов платформенного типа. При поисках месторождений, обусловленных подмерзлотными напорными водами, основными задачами являются оценка мощности многолетнемерзлых пород и выявление участков, где она достигает минимальных значений. Как правило, здесь отмечается наибольшая водообильность, и вскрытие водоносного горизонта требует минимальных затрат. При разведке месторождений решаются те же задачи, что и при поисках, но с большей детальностью. Кроме того, иногда требуется выявить связь подмерзлотных вод с поверхностными или грунтовыми водами, а также оценить степень минерализации подмерзлотных вод. Основным методом служит ВЭЗ, иногда дополняемое при малой глубине исследований ВЭЗ-ВП. Оценивая мощность многолетнемерзлых пород при недостаточной эффективности электроразведки, видимо, следует прибегать к сейсморазведке МОВ.

В ряде случаев при изучении гидравлической связи подмерзлотных напорных вод с грунтовыми и поверхностными требуется выявить в пределах исследуемой площади таликовые зоны. Методика таких исследований рассмотрена выше.

При поисках и разведке месторождений напорных подмерзлотных вод целесообразно вести наблюдения по системе маршрутов — поперечников. Расстояние между поисковыми профилями должно быть в два—три раза меньше ожидаемой длины перспективного участка. Расстояние между точками ВЭЗ (или ВЭЗ-ВП) по профилю следует брать равным $(0,1 \div 0,2) AB_{\max}$. При разведке участка сеть наблюдений сгущается в 2—3 раза.

Месторождения глубоких подмерзлотных вод. Фактические данные по этой разновидности месторождений отсутствуют. Видимо, можно использовать метод ВЭЗ с большими расстояниями при большой мощности четко геоэлектрически выделяющегося горизонта, залегающего под сравнительно маломощной

толщей многолетнемерзлых пород. В более сложных случаях следует использовать сейсморазведку МОВ (или КМПВ) для глубинных исследований и электроразведку для изучения верхней части разреза.

5.4. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В ПОРОДАХ ЗОН ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ И ЭКЗОГЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Месторождения этого типа, имеющие широкое распространение в криолитозоне, приурочены как к артезианским бассейнам (когда верхняя часть разреза сложена массивными породами — известняками, базальтами, плотными песчаниками и др.), так и к гидрогеологическим массивам. По этим месторождениям накоплен достаточно большой опыт геофизических работ, особенно в связи со строительством железных дорог [23, 33 и др.].

К этому типу месторождений относятся те, которые образованы за счет эндогенной и экзогенной трещиноватости. Первая отличается вертикальной зональностью, вторая охватывает верхнюю часть скальных пород; трещиноватость последних усилена за счет многократного промерзания и оттаивания пород.

Для рассматриваемых месторождений характерны приуроченность к долинам рек и малая мощность аллювиальных отложений, обычно нацело промороженных, в связи с чем подмерзлотные воды циркулируют преимущественно в трещиноватых породах скального основания. Максимальная трещиноватость, как правило, приурочена к зонам разломов, антиклинальным структурам, контактам пород различного состава и возраста, пересекающих долины. По особенностям геолого-геофизической характеристики, определяемой главным образом составом водовмещающих пород, можно выделить три подтипа месторождений: 1) в карбонатных породах, 2) в песчано-сланцевых образованиях различной степени метаморфизации и 3) в массивных кристаллических породах различного состава. Месторождения первого подтипа распространены преимущественно на площади Сибирской платформы, они приурочены к карбонатным породам кембрийского и более молодого возраста. Месторождения второго подтипа распространены на площади мезозоидов Северо-Востока СССР, в некоторых межгорных впадинах (на территории так называемых адартезианских бассейнов) и отчасти на площади Сибирской платформы, когда в разрезе коренных пород преобладают песчаники. Месторождения третьего подтипа приурочены главным образом к массивам магматических и древних метаморфических пород, широко распространенных в Сибири и на Дальнем Востоке.

В геофизических полях наиболее ярко представлены первый и последний подтипы месторождений. Для первого подтипа

это обусловлено интенсивными процессами карстообразования и частым подтоком высокоминерализованных вод. Месторождения последнего подтипа четко характеризуются в магнитных полях. Наименее геофизически выразительны месторождения второй группы. Вследствие этого, особенно при исследовании ограниченным комплексом методов и стандартном подходе, геофизические исследования месторождений второй группы осуществляются иногда с низким эффектом. Поскольку в методике изучения всех перечисленных подтипов много общего, а опыта для детальной характеристики отдельных видов месторождений недостаточно, рассмотрим методику исследования всех их совместно.

Поисковая стадия¹ геофизических работ нацелена на оконтуривание участков, отмечающихся повышенной трещиноватостью и соответственно увеличенной водообильностью подмерзлотных вод, циркулирующих в зонах экзогенной и эндогенной трещиноватости. Практически это реализуется путем геологического картирования коренных пород с выделением основных литологических разностей, сравнительно высоко- и низководообильных, прослеживанием зон разломов, контактов разнородных пород и участков повышенной трещиноватости. Параллельно оценивается мощность рыхлых образований, залегающих на скальном (полускальном) основании, оконтуриваются области распространения многолетнемерзлых пород, выявляются таликовые зоны. При предварительной разведке, помимо уточнения решений поисковой стадии, оценивается литологический состав рыхлых пород; изучается гипсометрическая поверхность ненарушенных массивных пород (т. е. определяется мощность трещиноватых пород, либо суммарная мощность их с рыхлыми образованиями); районируется территория по степени трещиноватости пород с выделением участков, где интенсивно развиты процессы глинистой кольматации; выявляется преимущественное направление трещиноватых пород; оцениваются при возможности азимут и угол падения зон разломов и тектонических контактов; определяется мощность многолетнемерзлых, а также талых пород (в таликовых зонах); оценивается минерализация подземных вод; обнаруживаются зоны скрытой разгрузки глубоких напорных вод; определяются в таликовых зонах уровень грунтовых вод, а на водоразделах — мощность морозных пород и др.

При выборе поисково-разведочных участков необходимо учитывать геолого-структурные и гидрогеологические признаки, выявленные при гидрогеологической и геофизической съемке. Например, в условиях Сибирской платформы на гидрогеологические условия оказывают большое влияние антиклинальные структуры, трапповые интрузии, трубки взрывов. Они

¹ В настоящее время не представляется возможным поисковую стадию подразделить на общие и детальные поиски.

обуславливают барраж подземного потока в трещиноватых породах, благодаря чему происходят концентрация потока и выходы мощных источников подземных вод.

На поисковой стадии используются электропрофилирование, ВЭЗ, резистивиметрия (вместе с термометрией), магниторазведка. Можно привлекать имеющиеся материалы по гравиметрической и другим видам съемок, ранее проведенных на участке. В сложных случаях возможна и специальная постановка гравиметрических наблюдений. При разведочных работах упомянутые выше методы электроразведки могут дополняться методами ЕП, ВЭЗ-ВП, КВЭЗ, реже микромагнитной и эманационной съемкой и сейсморазведкой КМПВ, которая применяется редко. Связано это, как указывалось выше, со сложными условиями транспортировки оборудования, плохой проходимость местности, трудностью организации буровзрывных работ. Тем не менее, сейсморазведку КМПВ следует опробовать при детальном исследовании, когда другие методы не могут решить наиболее важных задач. Обычно из всего перечня геофизических методов используется не более 3—4 методов (после выполнения в необходимых случаях опытных работ).

При поисковых работах прокладываются профили (маршруты) перпендикулярно основному простиранию структур или геоморфологических элементов, имеющих определяющее значение для распространения изучаемых гидрогеологических структур. При невыясненном направлении структур и мозаичном геофизическом поле съемку, особенно на поисковом этапе, следует выполнять по системе ортогональных профилей.

Электропрофилированием, как правило, изучается вся поисковая площадь. Наиболее часто используется двухразное симметричное ЭП с большими разносами AB , варьирующими от 100 до 300—500 м (иногда при значительной мощности мерзлых пород — до 1000 м и более), малыми $A'B'$ — от 20—50 до 100 м. При поисках расстояние между профилями ЭП и магниторазведки составляет соответственно в среднем 100—200 м при шаге наблюдений 20—50 м для ЭП и 10—20 м для магниторазведки; при предварительной разведке расстояние между профилями и шаг наблюдений сокращаются примерно вдвое.

Основная масса ВЭЗ выполняется после проведения ЭП. Разносы $AB_{\max} = 0,5 \div 1$ км, реже 2 км и более. При поисках расстояние между профилями, на которых ставятся ВЭЗ, варьируют от 200 до 1000 м, в среднем составляя около 500 м, шаг наблюдений — от 100 до 250 м. При предварительной разведке сеть по методу ВЭЗ сгущается вдвое и более.

Остальные методы — КВЭЗ, ВП, ЕП, термометрия, сейсморазведка МПВ (КМПВ) и др., если их включение признано целесообразным, применяются на отдельных участках профилей, на небольших площадях, в разрозненных пунктах. Лишь резистивиметрией обследуются все имеющиеся водотоки и водо-

емы. При сейсморазведке применяется густой шаг наблюдений — 5—10, реже 20 м. Такого же порядка шаг при микромагнитной съемке и методе ЕП.

Основная площадь исследований при поисках составляет 5—20 км², при предварительной разведке — в 5—10 раз меньше. Глубина исследований равна 50—70 м, реже (при увеличенной мощности рыхлого покрова и мерзлых породах) — до 200—300 м. Результативные карты геофизических исследований при поисках составляются в масштабе 1:10 000—1:25 000, реже мельче, при разведке — 1:10 000—1:5000, иногда 1:2500. Помимо основной площади целесообразно изучить сопредельные территории с целью выявления и оконтуривания областей питания. Такого рода наблюдения выполняются в виде разрозненных маршрутов (ЭП, ВЭЗ, ЕП), отходящих в стороны от исследуемых участков.

Ряд примеров, характеризующих поисково-разведочные работы рассмотренного типа месторождений, главным образом на Северо-Востоке СССР, известны по опубликованной литературе [20 и др.]. Приведем данные, связанные с исследованиями последних лет в зоне БАМа. Работы здесь выполнены Мосгипротрансом, Ленгипротрансом, ЦНИИСом [33], кафедрой разведочной геофизики МГУ [23] и др.

Типичным примером работ Мосгипротранса является проведенная в 1977 г. под руководством В. С. Бабина геофизическая разведка в районе станции Федькин Ключ. Участок расположен в Забайкалье в зоне распространения гранитов и гнейсов, нарушенных разломами; мощность рыхлых отложений незначительная, рельеф местности сложный. Задача геофизических исследований заключалась в прослеживании контактов разнородных пород и зон разломов с выделением наиболее обводненных участков трещиноватых пород. Попутно требовалось оценить мощность аллювиально-делювиальных пород, оконтуривать таликовые зоны, выделить в разрезе многолетнемерзлые породы и т. п. Работы проведены на участке площадью около 15 км² по серии параллельных профилей, отстоящих друг от друга на 200, местами на 500 м. Вся площадь покрыта магниторазведкой с шагом, равным 25 м, и ВЭЗ по сети (200—300) × (300—600) м. На отдельных профилях выполнено дипольное профилирование и КВЭЗ. Результативный масштаб исследований примерно 1:10 000. В связи с небольшой глубиной разведки разносы АВ небольшие.

Магнитное поле участка отличается заметной неоднородностью. Положительные неоднородные аномалии соответствуют выходам гранитов, отрицательные и нулевые — гнейсам, узкие положительные на фоне отрицательных — зонам разломов. Последние могут также фиксироваться большими градиентами магнитного поля на фоне положительных, возможно, и отрицательных аномалий.

По данным интерпретации ВЭЗ построены геоэлектрические разрезы, на которых фиксируются три слоя (не считая отдельных мелких прослоев в приповерхностной части). Верхний слой в зависимости от состава и геокриологических условий имеет сопротивление, варьирующее от 900 Ом·м до десятков тысяч и более. Его мощность достигает 45 м. Для гнейсов характерно сопротивление от 900 до 2600 Ом·м, а для гранитов — от 3000 Ом·м и выше. Надопорный горизонт представляет собой кору выветривания коренных пород, либо аллювиально-делювиальные отложения. С этим горизонтом связаны наиболее водообильные образования. Сопротивление надопорного горизонта варьирует от 400 до 3000 Ом·м, а мощность — от 10 до 200 м. В долинах надопорный горизонт имеет наибольшую мощность. Опорный горизонт обладает практически бесконечным сопротивлением и имеет блоковое строение, причем опущенным блокам соответствуют наиболее трещиноватые зоны, для которых характерна высокая электрическая анизотропность.

В районе геофизических работ пробурена серия скважин. Сопоставление гидрогеологических данных с результатами геофизических исследований позволяет заключить, что последние в общих чертах могут охарактеризовать геолого-гидрогеологическую обстановку участка. Наиболее перспективными на трещинно-жильные воды являются участки пересечения зон разломов при сниженном сопротивлении кристаллических пород и увеличенной их анизотропности. Однако этих признаков (ни в отдельности, ни в совокупности) в ряде случаев недостаточно для однозначного решения основной задачи. Видимо, для повышения результативности геофизических методов необходимо более широко использовать многофакторный анализ.

В качестве другого примера приведем работы кафедры геофизики МГУ, проведенные в 1975 г. Б. П. Петрухиным под научным руководством А. А. Огильви. Исследования выполнены с опытно-производственными целями на нескольких участках в районе ст. Тында. Для названной работы характерны нестандартный подход (широкое варьирование методики в зависимости от конкретных геологических условий изучаемых участков), решение большого круга задач, типичных для крупного, а не децентрализованного водоснабжения, привлечение большого числа методов (что обеспечило комплексную интерпретацию с оптимальной достоверностью ее результатов). Наряду с полевыми широко поставлены и скважинные исследования. В числе полевых методов применены ЭП, ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и ЭП-ВП, ЕП, магниторазведка обычной и повышенной точности, резистивиметрия и термометрия. В целом работы кафедры геофизики МГУ имеют большое методическое значение с точки зрения решения простыми средствами обширного круга задач в сложных условиях криолитозоны.

6. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ

6.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ

Огромная внешняя береговая полоса Советского Союза, наличие внутренних морей (и соленых озер), создание на их берегу крупных портов и рост здесь больших городов — все это заставляет все большее внимание уделять поискам, разведке и эксплуатации месторождений морских побережий, объединенных нами в отдельную группу. При их изучении помимо обычных приходится решать и специфические задачи, связанные с разгрузкой пресных вод в морские бассейны и внедрением (интрузий) соленых морских вод в пресные континентальные подземные воды.

Подземные воды морских побережий могут быть как безнапорными, так и напорными. Изучение первых значительно проще. Для напорных вод характерны две основные разновидности (А. Ю. Брейве, 1975 г.). В одной изучаемый водоносный напорный горизонт выходит в морском бассейне на дне под маломощным покровом осадков; здесь происходит непосредственная гидравлическая связь напорных и морских вод. В другой — нет прямого выхода водоносного горизонта, гидравлическая связь осуществляется через слабопроницаемые породы кровли напорного горизонта.

При интенсивной эксплуатации месторождений процесс проникновения соленых вод в прибрежную континентальную зону резко активизируется. В условиях суши этому благоприятствуют речные долины, зоны разломов с интенсивной трещиноватостью и другие участки, где распространены породы с хорошими фильтрационными свойствами. Сокращение мощности донных осадков, замещение глинистых пород песчаниками, наличие зон разломов и древних долин, прослеживающихся далеко в море, — все это способствует проникновению соленых вод в водоносные горизонты с пресными водами. Для выявления гидрогеологических «окон» в пределах акватории целесообразно вести геологическое картирование коренных пород морского дна, изучать состав и мощность современных донных осадков, исследовать гипсометрию морского дна, которая, как правило, хорошо отражает неотектонику.

При решении перечисленных задач большую помощь могут оказать геофизические наблюдения, модифицированные для условий водной среды. Важное значение имеют различные донные установки электроразведки: резистивиметрия совместно с термометрией, ЭП, ЕП и ВЭЗ. Для ускорения наблюдений в усло-

виях малых глубин замеры проводят с помощью автоматической каротажной аппаратуры. В последнее время начинают привлекать ультразвуковые методы, в частности непрерывное акустическое профилирование (НАП) невзрывными источниками возбуждения.

Большинство рассмотренных в предыдущих разделах месторождений подземных вод могут формироваться в прибрежной зоне. При изучении их береговой части применяются изложенные в соответствующих разделах методические приемы. Вместе с тем необходимо решать и специфические задачи, своеобразие которых определяется в основном составом и физическим состоянием исследуемых пород. В соответствии с этим месторождения морских побережий подразделены на три подгруппы: а) в рыхлых песчано-глинистых породах, б) в скальных трещиноватых породах и в) в многолетнемерзлых породах. Ниже кратко охарактеризованы приемы решения основных задач в условиях морской среды [1, 4, 38, 47, 48 и др.]. Следует отметить большую роль А. А. Огильви и В. А. Богословского в разработке методики геофизических наблюдений при этих исследованиях.

Определение мощности и состава рыхлых донных осадков. Обычно мощность этих осадков в прибрежной зоне невелика. Она измеряется первыми десятками метров. Для оценки мощности может использоваться ЭП с отдельными пунктами ВЭЗ и НАП. Последний метод наиболее эффективен при толщине слоя воды более 20 м. Для характеристики литологического состава донных осадков могут использоваться те же методы, а также метод ЕП. При интерпретации данных ЭП целесообразно с помощью резистивиметра оценивать придонное сопротивление воды и на основании этого подсчитать относительное сопротивление R донных осадков; по величине R можно более надежно оценить их состав. Методом ЕП при геологическом картировании фиксируются в основном диффузионные потенциалы; глинистые породы отмечаются положительными аномалиями, а грубозернистые — отрицательными; причина изменения знака и интенсивности аномалий заключается в различной адсорбционной активности донных отложений.

Геологическое картирование коренных пород, прослеживание зон разломов, древних русел. В качестве основных методов используются ЭП, ВЭЗ, НАП, а также магнито- и гравиразведка. Последуются с гидрогеологическими целями не проводятся, привлекаются лишь готовые материалы. Приемы интерпретации обычные.

Обнаружение и оконтуривание гидрогеологических «окоп», выявление и изучение субмаринных источников. Решение рассмотренных выше задач позволяет локализовать участки, где происходит или может активизироваться гидравлическая связь подземных и морских вод. В пределах обнаруженных гидрогео-

логических «окон» с помощью резистивиметрии, термометрии и метода ЕП непосредственно оконтуриваются выходы субмаринных источников. Эти методы позволяют приближенно оценить интенсивность, минерализацию и температуру источников, а путем повторных наблюдений выявить их режим. Термометрические наблюдения наиболее эффективны при толщине слоя воды не более 20 м; в противном случае температурная дифференциация подземных и морских вод становится несущественной. Геофизические исследования морского дна важно выполнять для напорных подземных вод и тогда, когда граница раздела соленых и пресных вод находится за пределами суши.

Изучение месторождений подземных вод в прибрежной зоне с помощью геофизических методов может производиться на всех стадиях работ. При общих поисках привлекаются имеющиеся данные среднемасштабных гидрогеологических и иных видов съемок; основная задача геофизических методов заключается в прослеживании зон проникновения морских вод в водоносные горизонты суши. Уточняется также гидрогеологический разрез в пределах прилегающей акватории. Задачи и методика детальных поисков и предварительной разведки отличаются своеобразием и рассматриваются в последующих разделах. При детальной и эксплуатационной разведке геофизические методы ориентируются на режимные наблюдения за субмаринными источниками и продвижением соленых вод в сторону водозабора.

6.2. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ РЫХЛЫХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Исследования проведены по побережью Черного и Азовского морей, Татарского пролива, Охотского моря и др. На стадии детальных поисков в наземных условиях основное внимание уделяется прослеживанию границы между пресными и солеными водами, а на акватории моря — задачам, позволяющим выявить гидрогеологические «окна». При предварительной разведке главные усилия направлены на исследование субмаринных источников. В морских условиях наибольшее применение находят ЭП, резистивиметрия, ЕП, а также термометрия [1, 22, 23]. Масштаб съемки при детальных поисках 1 : 50 000—1 : 25 000, при предварительной разведке — 1 : 10 000—1 : 5000 и крупнее. Площадь исследований соответственно изменяется от десятков и сотен квадратных километров при поисках до нескольких гектаров (в субмаринных условиях) — при разведке. Глубина исследований на суше редко превышает 100—200 м, в морских условиях — первые десятки метров.

В качестве примера применения геофизических методов в прибрежных условиях рассмотрим результаты работ, проведенных в 1973 г. УГ при Совете Министров Молдавской ССР под

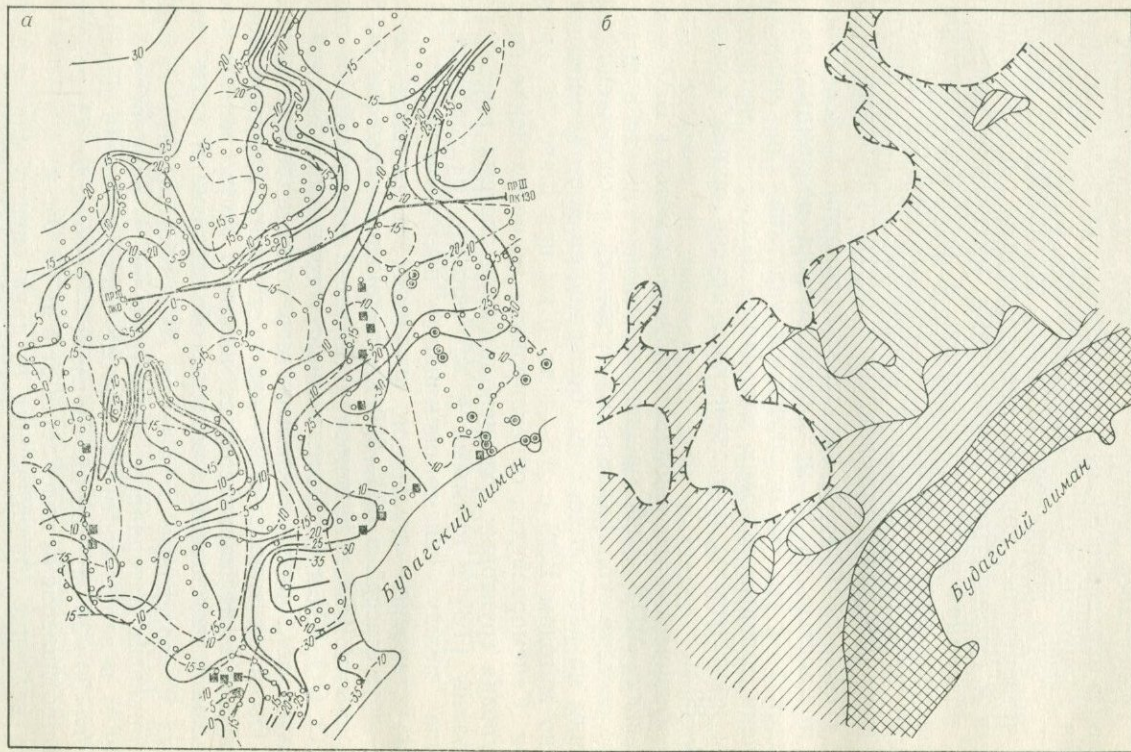
руководством В. Е. Бойко на Сергеевской площади Одесской области (рис. 20). Исследования выполнены на стадии детальных поисков подземных вод для курорта Сергеевка. Участок работ площадью в 230 км² располагается вдоль берега Черного моря. Требовалось оконтурить площади распространения пресных вод в верхнеэоценовых отложениях, определить положения уровня грунтовых вод, охарактеризовать глубину залегания и относительную проницаемость пород регионального водоупора.

В четвертичных породах, представленных гравийно-галечниковыми и суглинистыми отложениями, имеющими мощность до 20 м, подземная вода сосредоточена в нескольких горизонтах. Ее минерализация меняется от 0,2 до 6 г/л; водообильность, как правило, невысокая. Основной водоносный комплекс приурочен к залегающим ниже аллювиальным верхнеэоценовым отложениям (N₂³), сложенным песчаником, гравием, галечниками общей мощностью до 18 м; минерализация подземных вод составляет 1—2 г/л, за исключением участков, где происходит интрузия соленых морских вод. Ниже залегают водоупорные глины понтического и меотического ярусов общей мощностью до 70—80 м.

Геофизические исследования включали методы ВЭЗ и сейсморазведку МПВ. Наблюдения выполнены в совмещенных точках по системе субпараллельных профилей, расположенных друг от друга на расстоянии 2 км. Большинство поставленных задач решено методом ВЭЗ с AV_{\max} до 1 км при шаге в среднем 0,5 км. Сейсморазведка ориентирована на определение положения уровня грунтовых вод; использована система точечных зондирований (ТЗ) с прямыми и встречными годографами. Расстояние между сейсмоприемниками преимущественно 7,5 м; длина установки — до 172 м; источник возбуждения колебаний — груз массой в 300—600 кг, падающий с высоты 3—5 м.

Кривыми ВЭЗ зафиксирован сложный многослойный разрез типа Q, QQ, КН и др. Прослежено три горизонта: верхний соответствует покровным суглинкам, его сопротивление $\rho_1 = 20 \div 60$ Ом·м, а мощность h_1 — до нескольких десятков метров; второй горизонт характеризует нижнюю часть зоны аэрации и основной водоносный комплекс, объединяющий низы четвертичных и эоценовые отложения N₂³, обогащенные гравийно-галечниковым материалом, сопротивление ρ_2 варьирует от 9 до 25 Ом·м в зависимости от степени минерализации подземных вод, $h_2 = 30 \div 35$ м; третий горизонт — региональный водоупор, его сопротивление ρ_3 колеблется от 5 до 60 Ом·м.

По величине сопротивления ρ_2 дана оценка минерализации подземных вод основного водоносного горизонта. Зависимость $\rho(M)$ достаточно четкая (рис. 20, д). Установлено, что на северо-востоке участка минерализация подземных вод менее 1 г/л, а на юге и юго-западе достигает 3 г/л. В прибрежной полосе ши-



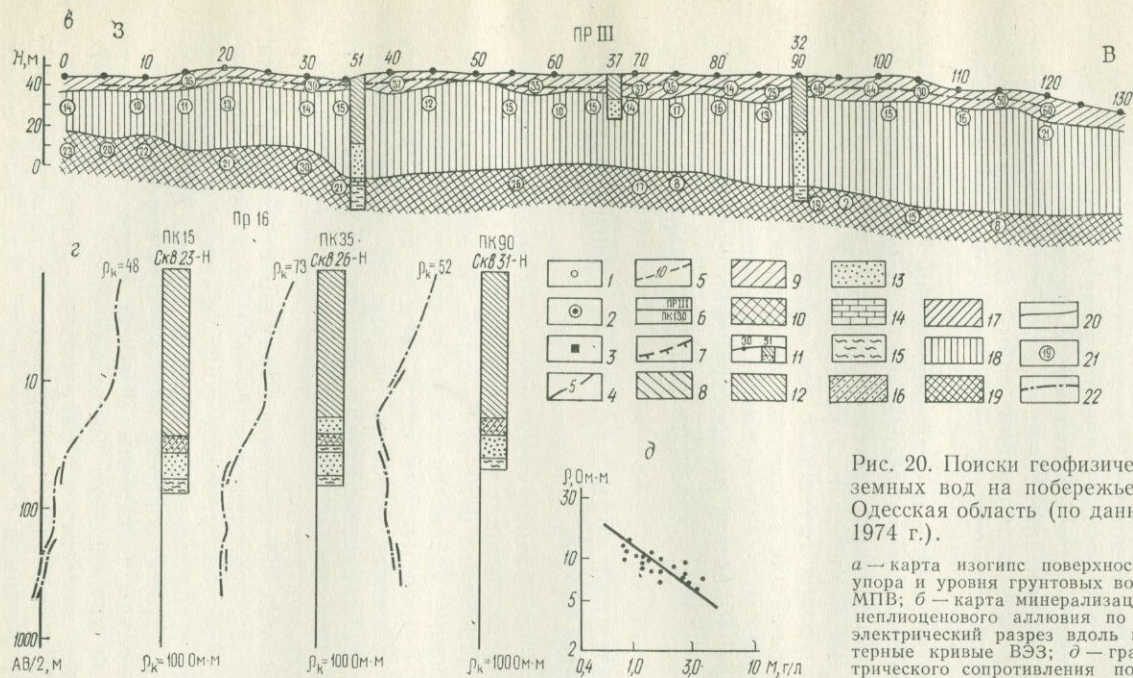


Рис. 20. Поиски геофизическими методами подземных вод на побережье Будагского лимана, Одесская область (по данным В. Е. Бойко и др. 1974 г.).

а — карта изогипс поверхности водоупора и уровня грунтовых вод по данным ВЭЗ и ТЗ МПВ; б — карта минерализации подземных вод верхнеплиоценового аллювия по данным ВЭЗ; в — геоэлектрический разрез вдоль профиля III; г — характерные кривые ВЭЗ; д — график зависимости электрического сопротивления пород от минерализации подземных вод; 1 — пункты ВЭЗ, совмещенные с ТЗ МПВ; 2 — гидрогеологические скважины; 3 — колодцы; 4 — изогипсы поверхности водоупора, м; 5 — изогипсы уровня грунтовых вод, м; 6 — положение в плане профиля III; 7 — граница распространения водоносного горизонта (верхнеплиоценового аллювия); минерализация подземных вод, г/л; 8 — до 1, 9 — от 1 до 3; 10 — область внедрения соленых вод; 11 — скважины и пикеты на профиле; литологический состав пород, пройденных скважиной; 12 — суглинки, 13 — песок, 14 — известняк, 15 — глина, 16 — супесь; геоэлектрические горизонты; 17 — верхний, 18 — надпорный, 19 — опорный (региональный водоупор); 20 — границы между геоэлектрическими горизонтами; 21 — удельное электрическое сопротивление горизонта, Ом · м; 22 — уровень грунтовых вод

риной 1—3 км фиксируется двухслойная толща с различной минерализацией: пресная и слабосоленоватая вода (1—3 г/л) «плавает» на более минерализованной, внедрившейся со стороны лимана. Такая двухслойность в минерализации часто наблюдается в прибрежной зоне.

По сейсморазведке прослежены две основные границы. Верхняя связана с уровнем грунтовых вод, нижняя, как полагают авторы, фиксируется повсеместно и обусловлена, по-видимому, останцами эрозивной поверхности плиоценового известняка. Там, где в разрезе преобладают пески, УГВ по скважине и сейсморазведке совпадают. Если же разрез сложен суглинками, граница, прослеживаемая сейсморазведкой, расположена выше за счет капиллярной каймы. В первом случае величина граничной скорости v_r составляет 1,6—1,9, во втором — 1,9—2,2 км/с.

Сочетание электро- и сейсморазведки оказалось весьма удачным. Оно позволило полнее решить гидрогеологические задачи и более обоснованно интерпретировать кривые ВЭЗ. Основные результаты исследований представлены в виде карт минерализации и уровня грунтовых вод масштаба 1:50 000. Доказано, что дальнейшие гидрогеологические исследования с целью поисков пресных вод следует проводить на площади, ограниченной на севере областью распространения аллювиальных отложений N_2^3 , а на юге — контуром интрузии соленых морских вод.

6.3. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ТРЕЩИНОВАТЫХ СКАЛЬНЫХ ПОРОД

Изучение геофизическими методами месторождений прибрежной зоны, сложенных трещиноватыми скальными породами, проведено в Приморье и на о. Сахалин. В этих исследованиях главное внимание уделяется зонам разломов, по которым осуществляется гидравлическая связь между пресными континентальными и солеными морскими водами. В одних случаях эти зоны питают субмаринные источники пресной водой, в других, — наоборот, по ним происходит интрузия соленых морских вод в пресные воды континента.

Зоны разломов, по которым циркулирует соленая вода, довольно легко обнаруживаются с помощью электроразведки. Установлено, что электрическое сопротивление ρ трещиноватых скальных пород, насыщенных пресной водой, примерно на порядок ниже ρ нетрещиноватых (массивных) пород; если же трещиноватые породы насыщены морской водой, их сопротивление падает на два порядка (по сравнению с ρ массивных пород) и может измеряться единицами — первыми десятками ометров. Это позволяет обнаружить по электрометрическим данным зоны разломов с соленой водой. Для более надежного

выявления зон разломов необходимо применять и другие геофизические методы.

В связи с недостаточным опытом геофизических исследований трудно конкретно охарактеризовать особенности методики изучения рассматриваемой подгруппы месторождений. По-видимому, она близка к методике изучения соответствующих месторождений в рыхлых породах с той лишь разницей, что при изучении трещиноватых скальных пород преобладают разные методы профилирования, используется магниторазведка, а сами исследования ведутся по более детальной сети наблюдений.

Приведем несколько примеров геофизических работ из зарубежной и отечественной практики.

В прибрежных отложениях п-ова Селентина (Италия), где разрез сложен мезозойскими известняками, установлено проникновение соленых морских вод [47]. Для оконтуривания интрузий морской водой как по площади, так и в разрезе использован метод ВЭЗ. Резкое понижение сопротивления известняков, насыщенных морской водой, способствовало успешному решению задачи. Соленая вода обнаружена на глубинах 25—30 и 300—600 м.

Аналогичные исследования проведены в одном из прибрежных районов Греции (Сатракис, Ставрос Д., 1972 г.). Здесь также водоносны известняки (J—K), обладающие значительной мощностью; они подстилаются метаморфическими породами, местами перекрыты четвертичным аллювием и глинистыми образованиями неогена. Известняки интенсивно дислоцированы, трещиноваты и закарстованы. По гидрогеологическим данным установлено существование протяженных зон трещиноватости, по которым циркулируют подземные воды. Это подтверждается наличием пресных источников на побережье и на дне моря. Метод ВЭЗ в пределах береговой полосы позволил расчленить разрез известняков, выделив в нем мощную зону аэрации ($\rho \approx 6000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и толщу водообильных пород; ρ трещиноватых известняков с пресной водой составляет 1200—3000, а с морской — лишь 40 Ом·м. Электроразведка показала, что соленые воды моря внедряются в трещиноватые известняки на расстоянии до 3 км от береговой линии.

В южной части о. Сахалин Сахалинским ТГУ под руководством В. И. Поносова проведены в 1972 г. геофизические исследования с целью детальных поисков подземных вод для водоснабжения г. Корсакова. На участке работ площадью около 10 км², расположенном в долине реки, маломощные четвертичные отложения перекрывают плотные терригенные метаморфизованные образования третичного возраста. Последние разбиты отдельными разломами, местами развита мощная зона экзогенной трещиноватости. Иногда по зонам тектонических нарушений поступают со стороны моря соленые воды. Основные запасы пресных вод приурочены к участкам повышенной трещиноватости.

По геофизическим данным требовалось определить мощность зоны трещиноватых коренных пород, проследить крупные тектонические разломы и определить в их пределах участки проникновения соленых морских вод. Глубина исследований 100—150 м. На всей площади проведено двойное симметричное профилирование с разносами $AB = 500$ и $A'B' = 300$ м по сети 250×25 м; в отдельных пунктах — ВЭЗ с $AB_{\max} = 1$ км. На одной скважине применен метод заряженного тела (МЗТ). Профили расположены перпендикулярно направлению долины реки. С помощью ЭП решены основные задачи; роль ВЭЗ и МЗТ вспомогательная. Результативный масштаб исследований 1 : 25 000. Интерпретация данных ЭП оказалась довольно сложной, поскольку зоны разломов могут отражаться и минимумами и максимумами ρ_k . Однако зоны, по которым циркулирует соленая вода, выделены по минимумам ρ_k достаточно надежно, что обеспечивает решение основной задачи. По-видимому, для большей эффективности следовало бы в комплекс включить сейсмо-разведку КМПВ.

6.4. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

В условиях Крайнего Севера в прибрежной зоне распространены многолетнемерзлые породы, что существенным образом осложняет поисково-разведочные работы. Изучаемые здесь месторождения подземных вод расположены в устьях рек и ручьев, где распространены аллювиальные, озерные и прибрежморские отложения. Морские воды вклиниваются в береговую область, причем при грубообломочных отложениях «клин» соленых вод достигает 1—2 км и более. В настоящее время геофизическими методами исследовано значительное число месторождений. В этих работах большое участие приняли В. А. Кириллов, Г. М. Нищанский и др. Изученные месторождения, как правило, мелкие, расположены вдоль берега Ледовитого океана, Берингова и северной части Охотского морей. Среди них можно выделить две разновидности: а) месторождения, приуроченные к рыхлым породам подрусловых таликов; б) месторождения, приуроченные к зонам разломов в складчатом основании. Исследования второго типа месторождений отличаются тем, что необходимо изучать как породы рыхлого покрова, так и скального основания (в мерзлом и талом состоянии).

Общие поиски для изучения этих месторождений не проводятся. Геофизические исследования начинаются совместно с гидрогеологической и геокриологической летней и зимней съемками. На поисковом этапе масштаб геофизических съемок 1 : 25 000—1 : 10 000, при предварительной разведке — 1 : 10 000, реже 1 : 5000. Площадь геофизических работ на одном участке при детальном поисках варьирует от 5—10 до 30—40 км²; при предварительной разведке составляет лишь несколько первых квад-

ратных километров. Глубина исследований колеблется от 25 до 200—300 м, но чаще равна 100—150 м. Задачи, решаемые геофизическими методами в пределах береговой полосы, сводятся к выявлению и прослеживанию площади таликов различного генезиса, оценке мощности ММП; определению мощности сезонно-талого слоя и мощности талых пород в устойчивых (несквозных) таликах; прослеживанию зон тектонических разломов и контактов пород складчатого основания (фундамента) под покровом рыхлых образований; определению мощности рыхлого покрова; оценке мощности трещиноватых пород под толщей ММП; оконтуриванию участков с небольшой водообильностью талых пород; сравнительной оценке минерализации подземных вод и оконтуриванию участков, где имеет место внедрение соленых морских вод. Перечисленные задачи решаются как при поисках, так и при разведке. Отличие заключается лишь в степени детальности. Следует отметить, что на практике не обнаруживается четкого разделения стадий исследований. Изучение морской акватории в связи с малыми размерами месторождений до сих пор не проводится.

Комплекс геофизических методов ограничивается ЭП и ВЭЗ. Значительно реже используются наземная магниторазведка, ДЭМП, МЗТ и др. Сейсморазведка и метод ВЭЗ-ВП не применяются, хотя их эффективность доказана в аналогичных условиях других регионов.

ЭП, как правило, выполняется по системе параллельных профилей симметричными установками с двумя разносами. С помощью ЭП покрывается вся площадь для разрешения основных задач. Профили ориентируются вкрест долин рек и других орографических элементов. Большие разносы (в комплексе с малыми и ВЭЗ) используются для выявления сквозных таликов, малые — для изучения приповерхностной части разреза. Разносы AB варьируют на различных участках от 200 до 700 м, чаще составляют 300—500 м, разносы $A'B'$ — от 30 до 300 м, чаще 50—100 м; сеть наблюдений — $(100-500) \times (10-50)$ м.

ВЭЗ используются для выбора разносов установок ЭП, получения геоэлектрических параметров изучаемых пород, расшифровки графиков ρ_k ЭП и вертикального расчленения разреза с оценкой мощности и физического состояния слагающих его пород. Разносы AB_{\max} составляют 1—2 км. Пункты ВЭЗ располагаются на профилях ЭП. Сеть наблюдений $(1000-1500) \times (100-250)$, чаще 1000×100 м; при детализации шаг наблюдений и расстояние между профилями сокращаются вдвое и более. При отсутствии четко выраженных протяженных таликов исследования ведутся лишь методом ВЭЗ по сети $100 \times (50-100)$ м.

Магниторазведка применяется в условиях малой мощности рыхлых четвертичных отложений на первом этапе поисковых работ, предшествуя электроразведке, позволяя сконцентриро-

вать последнюю на ограниченных участках. Сеть наблюдений $(500-250) \times (50-25)$ м.

При изучении крупных месторождений в прибрежной зоне особенно важным является вопрос взаимодействия при интенсивной эксплуатации пресных подземных и соленых морских вод. Необходимо иметь представление о фильтрационной характеристике пород, слагающих не только береговую полосу, но и дно моря; важно установить, имеются ли многолетнемерзлые породы в прибрежной части акватории и выявить субкавалльные зоны разгрузки подземных вод. По опыту отечественных и зарубежных исследований, главным образом инженерно-геологического направления, эта задача вполне разрешима с помощью морского электропрофилеирования, ВЭЗ, метода ЕП, резистивиметрии и термометрии; в особо важных случаях может применяться непрерывное сейсмоакустическое профилирование.

В качестве характерного примера выполненных в настоящее время геофизических работ рассмотрим результаты на участке, расположенном вблизи пос. Хатырка (Берингово море). Исследования проведены в 1973 г. СВТГУ под руководством В. А. Кириллова. В районе развиты вдоль долин рек и ручьев аллювиальные отложения Q, залегающие на песчано-глинистых метаморфизованных образованиях N. Водовмещающими являются песчаники и конгломераты подрусловых таликовых зон. Задача геофизических исследований заключалась в выявлении и оконтуривании сквозных таликовых зон, определении мощности ММП и обнаружении клина соленых вод. Площадь исследований — 15 км^2 , результативный масштаб съемки 1:10 000, глубина разведки — 200—400 м. Использовано симметричное двухразносное электропрофилеирование с разносоми $AB = 120$ м и $A'B' = 60$ м и ВЭЗ с $AB_{\text{max}} = 1 \div 2$ км. Профили ЭП пересекают долины; сеть наблюдений $100-200 \times 10-20$ м. ВЭЗ выполнены с шагом 100—200 м по трем разрозненным профилям, протягивающимся через водоразделы и долины. Количество пунктов ВЭЗ составляет около 7% от общего количества точек ЭП. Зонами пониженных сопротивлений вдоль ручья Хатырка прослежен сквозной талик. Под толщей многолетнемерзлых пород ($\rho \approx 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) выявлено два горизонта: верхний, насыщенный пресными водами ($\rho = 350 \div 550 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), и нижний с водами повышенной минерализации за счет проникновения морских вод (его сопротивление фиксируется конечной ветвью кривой ВЭЗ с $\rho \rightarrow 0$). В целом поставленные задачи успешно решены.

Примеры использования с гидрогеологическими целями геофизических методов на площади морских акваторий описаны в работах А. А. Огильви и В. А. Богословского [1 и др.].

7. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ КАРОТАЖ

Каротаж скважин является неотъемлемой частью геофизических исследований при поисках и разведке подземных вод. С одной стороны, данные каротажа служат для получения основных сведений, необходимых для документации гидрогеологических скважин, с другой — их используют в качестве опорных материалов при интерпретации результатов наблюдений наземных геофизических методов. В последние годы каротаж стали применять также при эксплуатации гидрогеологических скважин в целях восстановления утерянной документации, контроля за ремонтом, выявления возможностей повышения дебиты и т. д.

Методика каротажных исследований зависит от особенностей геологического и гидрогеологического разрезов скважин и характера решаемых задач.

7.1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ КАРОТАЖА

Документация гидрогеологических скважин методами каротажа сводится к решению трех основных задач: 1) литологическое расчленение разреза и выделение в нем водоносных горизонтов и водоупорных слоев; 2) определение минерализации подземных вод; 3) оценка емкостных и гидродинамических характеристик водоносных горизонтов.

При изучении гидрогеологии обширных территорий, в частности артезианских бассейнов, каротажные материалы используют также для целей межскважинной корреляции.

Методы возможного решения перечисленных задач и особенности их применения при гидрогеологических исследованиях приведены в табл. 18.

Каротаж обычно проводят в необсаженных скважинах, заполненных глинистым раствором или чистой водой. Однако в ряде случаев приходится вести исследования в сухих или обсаженных скважинах. В последнем случае наилучшие результаты можно получить при использовании асбоцементных или полиэтиленовых труб (М. И. Плюснин, 1972 г.; В. А. Ряполова, 1964 г.).

7.2. КАРОТАЖ СКВАЖИН, ПРОЙДЕННЫХ В РЫХЛЫХ ПОРОДАХ

Литологическое расчленение разрезов и выделение водоносных горизонтов. В разрезах, сложенных песчано-глинистыми отложениями, коллекторами воды являются рыхлые разности

Таблица 18

Метод	Исследуемый параметр	Решаемые задачи	Условия и особенности применения метода
<p>Кажущегося сопротивления (КС):</p> <p>а. измерения ρ_k стандартным зондом</p> <p>б. повторные измерения ρ_k малым зондом при смене минерализации бурового раствора</p> <p>в. измерения ρ_k двумя зондами с разными радиусами исследования</p>	<p>Кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_k</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литологическое расчленение разреза, выделение водоносных горизонтов, качественная оценка состояния пород и минерализации подземных вод 2. Межскважинная корреляция <p>Выделение водопроницаемых участков и оценка их относительной водопроницаемости</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Уточнение границ слоев. 2. В случае глубокого повышающего проникновения выделение водопроницаемых участков. 3. Определение относительного сопротивления P 	<p>Метод является обязательным при исследовании необсаженных скважин, заполненных глинистым раствором или водой. В качестве стандартного рекомендуется градиент-зонд длиной 2 м (при диаметре скважин более 200 мм) и 1 м (при меньшем диаметре скважин).</p> <p>Проведение метода возможно только в скважинах, стенки которых сохраняют устойчивость без глинистого раствора. Для усиления эффекта водопоглощения в скважине создается небольшое давление. Постановка метода целесообразна только тогда, когда статические уровни у всех водоносных горизонтов одинаковы. Длина зонда должна немного превышать диаметр скважины.</p> <p>Для измерений обычно используют стандартный градиент-зонд и потенциал-зонд, полученный из первого путем замены назначения его двух крайних электродов.</p> <p>Для определения P пользуются двумя малыми непродельными потенциал-зондами.</p>
<p>Боковое каротажное зондирование (БКЗ)</p>	<p>Удельное электрическое сопротивление пород в естественном состоянии ρ_n и породы, заполненной фильтратом промывочной жидкости $\rho_{зп}$</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Выбор стандартного зонда 2. Определение параметров ρ_n, $\rho_{зп}$ и P. Полученные данные используют для уточнения литологической характеристики пород количественной оценки минерализации подземных вод и емкостных свойств коллекторов 	<p>Ставится во всех разведочных скважинах, когда водоносные пласты имеют достаточно большую мощность (не менее 4 м) и сравнительно однородны по строению. Для измерений применяют четыре зонда длиной от 0,3 до 4 м в зависимости от диаметра скважины, мощностей и удельных сопротивлений отдельных пластов, составляющих разрез.</p>
<p>Микрокаротаж (МЗ)</p>	<p>Кажущиеся удельные сопротивления пород в зоне, непосредственно примыкающей к стенкам скважины, для двух радиусов исследования</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Детальное расчленение тонкослоистых разрезов и выделение в них водопроницаемых и водоупорных слоев с мощностью до 5—10 см 2. Оценка относительного сопротивления и пористости коллекторов 	<p>Применяется при изучении коллекторов со сложным строением, представленных частым чередованием водопроницаемых и водонепроницаемых слоев.</p> <p>Исследования обычно проводятся в скважинах, пробуренных с глинистым раствором. Для выделения отдельных трещин в скальных породах метод может применяться также в скважинах, пройденных с чистой водой.</p> <p>Измерения проводятся двумя микрозондами: градиент-микрозондом А0,025М0,25N и потенциал-микрозондом А0,05М.</p>
<p>Скользящих контактов (МСК)</p>	<p>Кажущееся удельное сопротивление ρ_k</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литологическое расчленение разреза; получение удельных сопротивлений и мощностей пластов. 2. Выделение трещиноватых зон в скальных породах. 	<p>Применяется главным образом для изучения верхней сухой части скважин с целью получения параметрических данных для интерпретации материалов полевой электроразведки. Исследования возможны только в необсаженных скважинах с устойчивыми стенками.</p>

Метод	Изучаемый параметр	Решаемые задачи	Условия и особенности применения метода
Естественных потенциалов (ПС)	Естественная разность потенциалов $U_{ПС}$ — функция диффузионно-адсорбционной и фильтрационной активностей пород	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разделение глинистых и неглинистых пород. 2. Прослеживание контакта мерзлых и талых рыхлых отложений. 3. Определение минерализации воды, содержащейся в коллекторах, сложенных рыхлыми отложениями 	<p>Входит в обязательный комплекс исследований вместе с методом КС, если в районе отсутствуют промышленные помехи.</p> <p>Кривая регистрируется дважды при двух растворах различной минерализации.</p>
Вызванных потенциалов (ВП)	Вызванная разность потенциалов $U_{ВП}$ — функция поляризуемости пород	Уточнение литологической характеристики пород	<p>Метод наиболее эффективен для расчленения талых и мерзлых песчано-глинистых отложений и выделения среди них суглинков и супесей, а также для дифференциации карбонатных разрезов и разделения карбонатных пород по отдельным разновидностям (известняки, доломиты, мергели).</p> <p>Для измерения применяют специальный четырехэлектродный зонд А0,04М0,04А2В. Сила поляризующего тока при исследовании талых пород от 20 до 500 мА, при изучении мерзлых пород — от 20 мкА.</p> <p>Имеется аппаратура для одновременного проведения обеих модификаций метода.</p>
Волновой электромагнитный каротаж (ВЭМК)			
а. волновой диэлектрический каротаж (ВДК)	Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ^*	1. Литологическое расчленение разреза, установление границ пластов, выделение водоносных горизонтов и оценка их водообильности.	Исследования могут проводиться как в зоне полного водонасыщения, так и в зоне аэрации (в сухих скважинах). Опыт работ незначителен.
б. волновой каротаж проводимости (ВПК)	Удельное электрическое сопротивление ρ	<ol style="list-style-type: none"> 2. Наблюдения за динамикой влажности в зоне аэрации 1. Литологическое расчленение разреза 2. Определение удельных сопротивлений малоомных слоев (>1 м) в средне- и низкоомных разрезах. 3. Оценка степени засоленности пород в зоне аэрации (В. С. Зинченко, Д. С. Даев, 1978 г.) 	
Гамма-каротаж (ГК)	Интенсивность естественного гамма-излучения $J_{Г}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литологическое расчленение пород, качественная дифференциация пород по содержанию глинистой компоненты, в особенности при условии пестрой или высокой минерализации воды. 2. Контроль правильности документации скважин после обсадки. 	Входит в комплекс обязательных методов. Применяется в любых геолого-технических условиях, в том числе в сухих и в обсаженных скважинах.
Нейтронный гамма-каротаж (НГК)	Интенсивность вторичного гамма-излучения $J_{НГ}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Выделение водоносных пород, оценка их емкостных характеристик 2. Оценка льдистости мерзлых пород 	Применяется только в комплексе с ГК. Наиболее эффективен при документации обсаженных скважин
Гамма-гамма-каротаж (плотностный) (ГГК-П)	Интенсивность рассеянного гамма-излучения $J_{ГГ}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литологическое расчленение пород, различающихся по плотности 2. Контроль за исправностью колонны 	Пока не нашел широкого применения при гидрогеологических исследованиях
Акустический (ультразвуковой) каротаж (УЗК)	Скорости распространения упругих волн: продольных v_p и поперечных v_r	<ol style="list-style-type: none"> 1. Литологическое расчленение талых и мерзлых пород; определение границ мерзлоты в рыхлых породах; выделение отдельных жил и пластов льда. 2. Оценка интенсивности трещиноватости 	Практически может применяться в любых геолого-технических условиях. Непосредственно для гидрогеологических целей широко не применяется из-за отсутствия серийной аппаратуры. Наиболее перспективен для исследования скальных и мерзлых пород. Для измерений рекомендуется трехточечный зонд при шаге наблюдений 20 см (М. Гафуров и др. 1972 г.).

Метод	Исследуемый параметр	Решаемые задачи	Условия и особенности применения метода
Термокартаж: при установившемся тепловом режиме в скважине	Температура t	1. Определение истинных температур пород и геотермического градиента. 2. Выявление температурных аномалий, связанных с геологическими и гидрогеологическими неоднородностями разреза. 3. Установление границ вечной мерзлоты.	Перед началом измерений скважина должна находиться в покое не менее 5—10 сут. Измерения обязательны в районах распространения вечной мерзлоты, а также при наличии в районе глубоких разломов и источников высокотемпературных минеральных вод.
при неустановившемся тепловом режиме		Решение технических вопросов: контроль за цементированием обсадной колонны; определение участков затрубной циркуляции воды.	
Магнитный картаж по методу магнитной восприимчивости (МК)	Магнитная восприимчивость χ	1. Получение данных о магнитной восприимчивости пород для интерпретации результатов полевой магниторазведки. 2. Разделение основных и кислых пород; локализация железистых участков.	Постановка метода целесообразна при изучении магматических пород. Опыт работ при гидрогеологических исследованиях незначителен.
Резистивиметрия: одноразовые измерения	Удельное сопротивление раствора в скважине ρ_c	Получение данных, необходимых для интерпретации других видов каротажа.	Входит в обязательный комплекс исследований при проведении каротажа методами КС, ПС, ВП, МЗ и БКЗ. Входит в обязательный комплекс при исследовании скважин, пройденных в устойчивых скальных породах и заполненных чистой водой. Может проводиться также в скважинах, оборудованных фильтрами.
периодические наблюдения за величиной ρ_c после изменения минерализации воды в скважине		1. Определение мест притоков и поглощения воды, установление интервалов перетока. 2. Определение скоростей осевого потока воды в скважине. 3. Определение послонных скоростей	
Расходомерия	Осевой расход воды по стволу скважины Q	фильтрации воды при отсутствии осевой составляющей скорости. 1. Выделение в разрезе водоотдающих, водопоглощающих и водопорных участков пород, определение их границ и частных дебитов водоотдачи или водопоглощения. 2. Определение удельных дебитов и статических уровней всех водоносных горизонтов.	Входит в обязательный комплекс при наличии в скважине нескольких напорных горизонтов с разными напорами. Может проводиться в незакрепленных скважинах с устойчивыми стенками и после обсадки их фильтровой колонной. При решении второй задачи метод обязательно сочетается с откачками или наливками.
Кавернометрия	Диаметр скважины $d_{св}$	1. Уточнение конструкции скважины и контроль за состоянием ее ствола. 2. Получение необходимых данных для интерпретации результатов других методов каротажа. 3. Уточнение сведений о литологии и состоянии пород	Постановка метода обязательна при проведении БКЗ, НГК, ГГК и расходомерии и при наличии в разрезе сильно кавернозных пород.
Фотокартаж	—	Фиксация отдельных трещин и определение их ориентации, изучение структурных и текстурных характеристик пород (Ю. В. Горшеник и др., 1978 г.)	Исследования проводятся в необсаженных скважинах, промытых чистой водой
Инклинометрия	Угол отклонения оси скважины от вертикали φ и азимут искривления φ	Изучение характера искривления скважины	Применяется только в глубоких скважинах. Методика обычная
Отбор грунтов грунтоносом		Получение сведений о гранулометрическом составе, пористости и водопроницаемости рыхлых коллекторов, намечаемых для эксплуатации	Практические примеры неизвестны. Может быть использована стандартная методика

пород, содержащие воду в порах. Это пески, галечники, песчаники, конгломераты. В плотно сцементированных песчаниках наряду с поровыми могут присутствовать и трещинные воды.

Бурение скважин в рыхлых породах осуществляется с промывкой глинистым раствором. Так как вода в песчано-глинистых разрезах приурочена только к определенным литологическим разностям, то задача выделения водоносных горизонтов сводится по существу к литологическому расчленению разреза.

Наиболее полные и достоверные сведения о геологическом разрезе скважины можно получить при совместном рассмотрении результатов нескольких геофизических методов. Для расчленения песчано-глинистых разрезов наиболее информативными являются обычные следующие методы: КС, ПС, ГК и ВП. Тем не менее в разведочных скважинах следует по возможности проводить более широкий комплекс исследований с целью выбора оптимального комплекса методов для данных конкретных условий.

Ниже приводятся признаки, по которым выделяются в разрезе основные типы пород, составляющих песчано-глинистые разрезы.

Глины. Удельное сопротивление глин обычно находится в пределах 2—10 Ом·м, несколько повышаясь у песчаных и карбонатных разностей. На кривых КС глины всегда проявляются минимальными значениями кажущихся сопротивлений, за исключением случая, когда они чередуются с песками, насыщенными соленой водой.

Графики БКЗ, отвечающие глинам, всегда имеют двухслойный характер. Иногда они бывают несколько сдвинуты вправо вследствие увеличенного диаметра скважины. На диаграммах микрокаротажа глины отмечаются равенством кажущихся сопротивлений, замеренных градиент-микрозондом и потенциал-микрозондом. Характер кривой ПС в глинистых отложениях зависит главным образом от удельного сопротивления глинистого раствора ρ_c . Если ρ_c превышает 2 Ом·м, то в глинах кривая ПС, как правило, отклоняется в сторону возрастания потенциала, в противном случае она чаще смещается в обратном направлении. Положение кривой ПС, соответствующее глинам, условно принимается за нулевое.

На диаграммах ВП глины проявляются характерным сближением двух кривых $\Delta U_{ВП+}$ и $\Delta U_{ВП-}$, замеренных при подсоединении питающего электрода А соответственно к положительному и отрицательному полюсу источника тока. Величина диэлектрической проницаемости у глин достигает 40 отн. ед. и более. На кривых ВДК против глин наблюдаются максимумы.

Глины выделяются наиболее высокими значениями I_T . Особенно высокой интенсивностью естественного гамма-излучения отличаются глины морского происхождения и глины, содержащие органические осадки. Известковистые глины имеют пони-

женные значения J_{Γ} . Кривые $J_{\text{НГ}}$ против глин всегда образуют минимумы. На кавернограммах глины легко обнаруживаются по увеличенному диаметру скважины.

Пески и галечники. Удельное сопротивление песков изменяется в широких пределах в зависимости от их водонасыщенности, минерализации воды и степени глинистости. Для водоносных песков оно колеблется от 3 до 250 Ом·м и определяется главным образом концентрацией солей, растворенных в воде. У чистых песков, содержащих пресную воду, удельное сопротивление обычно выше 30 Ом·м. Удельное сопротивление глинистых песков, как правило, заключается в пределах от 5 до 40 Ом·м и чаще всего составляет 15—20 Ом·м. Если удельное сопротивление песков превышает 250 Ом·м, то они в большинстве случаев практически безводны.

На кривой КС пески, насыщенные пресной водой, а также сухие пески всегда заметно отличаются от вмещающих глин по относительно высоким сопротивлениям. При этом крупнозернистые пески характеризуются несколько более высокими сопротивлениями, чем мелкозернистые. Глинистые пески занимают на кривой КС промежуточное положение между чистыми песками и глинами.

Графики БКЗ для мощных (более 4 м) проницаемых песчаных пластов с пресной водой, залегающих на больших глубинах, чаще всего соответствуют трехслойному типу с соотношением сопротивлений $\rho_c < \rho_{\text{зп}} < \rho_{\text{г}}$. Однако для высоконапорных горизонтов, а также пластов, залегающих на относительно малых глубинах, более характерны графики БКЗ двухслойного типа.

На диаграммах микрокаротажа пески выделяются по заметному расхождению между кривыми КС, снятыми потенциал-микрозондом и градиент-микрозондом. При этом в зависимости от соотношения удельных сопротивлений фильтрата промывочной жидкости и пластовой воды знак приращения может быть как отрицательным, так и положительным.

Возникновение потенциалов ПС в песчано-глинистых отложениях обуславливается диффузионными и фильтрационными процессами. В первом случае для их появления необходимо различие в минерализации пластовых и буровых вод, а во втором — наличие перепада давлений на уровне пластов.

Когда скважина заполнена раствором повышенной минерализации ($\rho_c < 2$ Ом·м), основное значение в формировании естественных потенциалов имеют диффузионные явления, и тогда кривая ПС против песков, содержащих пресную воду, отклоняется от «линии глин» в сторону положительных значений потенциала и тем больше, чем меньше концентрация солей в воде. При сравнительно высоком удельном сопротивлении глинистого раствора ($\rho_c > 2$ Ом·м) возрастает влияние на кривую ПС фильтрационных потенциалов, и тогда против песчаных отло-

жений почти всегда наблюдаются минимумы потенциала ПС независимо от соотношения между минерализациями раствора и пластовых вод. Если в скважине преобладают потенциалы фильтрации, то по кривой ПС часто прослеживается уровень грунтовых вод в песках по резкому возрастанию потенциала.

На кривых ВП пески характеризуются повышенной поляризуемостью по сравнению с вмещающими глинами. С увеличением минерализации воды поляризуемость песков заметно снижается. Максимальными значениями потенциала ВП проявляются супеси и суглинки. Увеличение потенциала $\Delta U_{ВП}$ наблюдается также при переходе от водонасыщенных песков к зоне аэрации. Аномально низкими значениями поляризуемости отличаются пылеватые грунты.

Пески характеризуются пониженными значениями ϵ^* (18—25 отн. ед.) по сравнению с глинами, и при залегании среди глин выделяются минимумами на кривых ВДК (В. С. Зинченко и др., 1978 г.). С уменьшением водонасыщенности величина ϵ^* снижается и в сухих песках составляет 4—5 отн. ед.

На кривых ГК пески выделяются по минимальным показаниям. Величина $J_{Г}$ не зависит ни от водонасыщенности песков, ни от минерализации наполняющей их воды и возрастает с увеличением содержания в них глинистых частиц. Аномально высокой естественной радиоактивностью обладают пески, содержащие радиоактивные минералы (монокит, глауконит и др.).

На диаграммах НГК пески проявляются в зависимости от их водонасыщенности. Водоносные пески, залегающие среди глин, выделяются на кривых НГК по небольшим максимумам. Сухие пески характеризуются очень высокими значениями $J_{нг}$.

Диаметр скважины в песках обычно близок к номинальному. Иногда наблюдается небольшое сужение его за счет образования глинистой корки. В сильно водонасыщенных песках диаметр скважины может быть увеличен.

Галечники проявляются на каротажных диаграммах так же, как и пески, за исключением кривой КС, на которой при прочих равных условиях они отличаются большими сопротивлениями, и кривой ВП, на которой они фиксируются по пониженным показаниям, близким к показаниям в глинах.

Песчаники. Удельное сопротивление песчаников изменяется от десяти до тысяч ом-метров в зависимости от их водонасыщенности, минерализации пластовых вод, а также от степени сцементированности и характера цемента. У водоносных песчаников оно составляет от 10 до 400 Ом·м. Если сопротивление песчаников превышает 400 Ом·м, то они, как правило, практически неводоносны. У песчаников с пресной водой сопротивление колеблется между 40 и 400 Ом·м, у песчаников с солевой водой — между 10 и 150 Ом·м.

На кривой КС песчаники всегда выделяются отчетливыми максимумами, амплитуда которых при прочих равных условиях

выше, чем у песков. Более высокими показаниями по сравнению с песками отличаются песчаники и на кривой НГК. На остальных диаграммах песчаники и пески проявляются примерно одинаково.

Ниже приведены примеры интерпретации каротажных диаграмм, снятых в песчано-глинистых разрезах.

На рис. 21 приведен пример разделения по каротажной диаграмме чистых и глинистых песков с пресной и минерализованной водой. При совместном рассмотрении кривых КС, ПС и ГК в разрезе выделены три водоносных песчаных пласта в интервалах 23,5—28; 30,5—34 и 38—44 м. По кривой ГК сделано заключение, что средний пласт представлен сильно глинистыми песками. Анализ кривой КС показал, что только верхний пласт содержит пресную воду ($\rho_{\text{к}} = 35 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), в нижних же пластах вода минерализована ($\rho_{\text{к}} = 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Нижние горизонты были тщательно изолированы, и из верхнего произведена откачка. Удельный дебит скважины оказался равным $0,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, сухой остаток воды — 765 мг/л [35].

На рис. 22 можно видеть изменение характера каротажной диаграммы при переходе от мелкозернистых к крупнозернистым пескам. Скважиной на 16 м вскрыты пески. В верхней части (до 25 м) в песках преобладают фракции $0,25\text{—}0,1 \text{ мм}$ ($\sim 55\%$) со значительной примесью пылеватых частиц ($\sim 15\%$). Ниже идут пески с преобладающим содержанием (до 80%) крупных фракций — $1\text{—}0,5$ и $0,5\text{—}0,25 \text{ мм}$ и гравия. При переходе от мелкозернистых песков к крупнозернистым величина КС возрастает с 35 до $55 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, немного снижается значение $J_{\text{Г}}$ и заметно увеличивается расхождение между двумя кривыми МЗ, свидетельствующее об улучшении фильтрационных свойств песков с увеличением крупности зерна. Сдвиг кривой ПС влево ниже 30 м объясняется некоторым повышением минерализации воды по направлению к забою.

На рис. 23 показан характер поведения кривых КС и ПС в сухих песках. Про появлении воды в песках кривая КС резко снижается, а кривая ПС сдвигается в сторону увеличения потенциала [35].

На рис. 24 приведен пример выделения в разрезе супесей по кривой ВП. В супесях, залегающих на глубинах 7—12; 16—18 и 27—28 м, наблюдается максимальная величина $\Delta U_{\text{ВП}}$, достигающая 75 мВ , в то время как в песках она составляет 25 мВ , а в глинах — 12 мВ .

При изучении больших территорий на основе совместного рассмотрения всех каротажных диаграмм в разрезе выделяются характерные реперы, по которым осуществляется межскважинная корреляция.

Определение минерализации подземных вод. В скважинах, которые бурятся с промывкой забоя, проба воды для химического анализа отбирается во время опытных откачек. Если

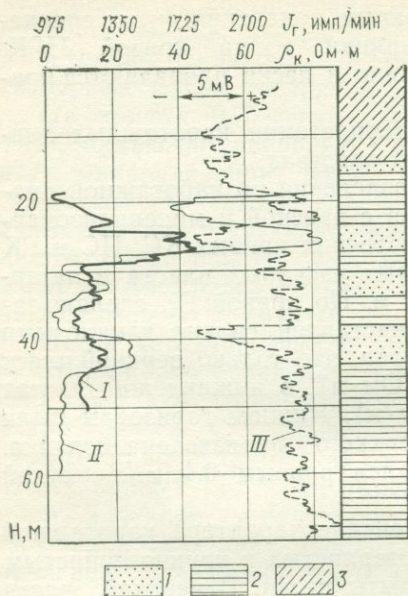
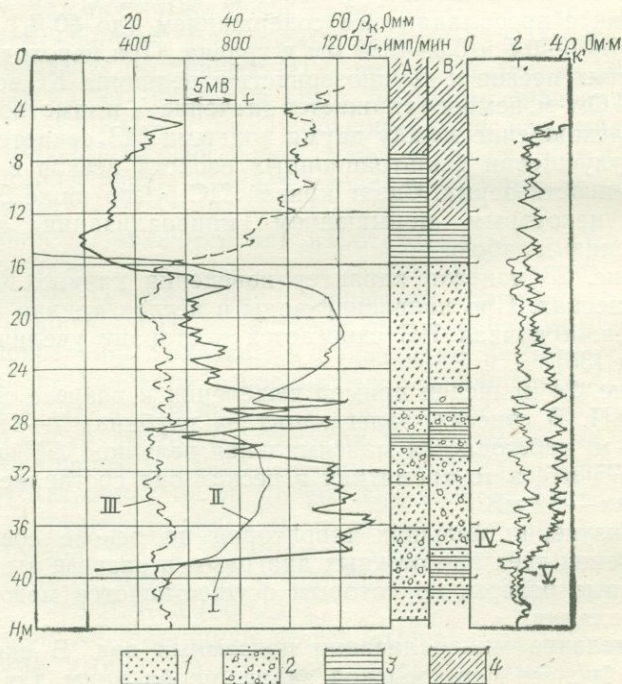


Рис. 21. Разделение песков с пресной и минерализованной водой по кривым КС, ПС и J_K . Скважина в Новосибирской области (диаметр скважины $d_{скв}$ до глубины 18 м — 168 мм, ниже — 146 мм; колонна — 19 м, $\rho_c = 1,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

I — кривая КС (зонд М2А0,25В); *II* — кривая ПС; *III* — кривая J_K ; 1 — песок; 2 — глина; 3 — суглинок

Рис. 22. Выделение водоносных песков и разделение песков различной зернистости по кривым КС, ПС, J_K и микрокаротажа. Скважина в Ростовской области ($d_{скв} = 140 \text{ мм}$, $\rho_c = 1,03 \text{ Ом} \cdot \text{м}$).

I — кривая КС (зонд М1А0,1В); *II* — кривая ПС; *III* — кривая J_K ; *IV* — кривая КС, снятая микроградиентозондом N0,025М0,25А; *V* — кривая КС, снятая микропотенциалзондом М0,05А; А — разрез скважины по данным бурения; В — то же по данным каротажа; 1 — пески; 2 — пески с галечником; 3 — глины; 4 — суглинки



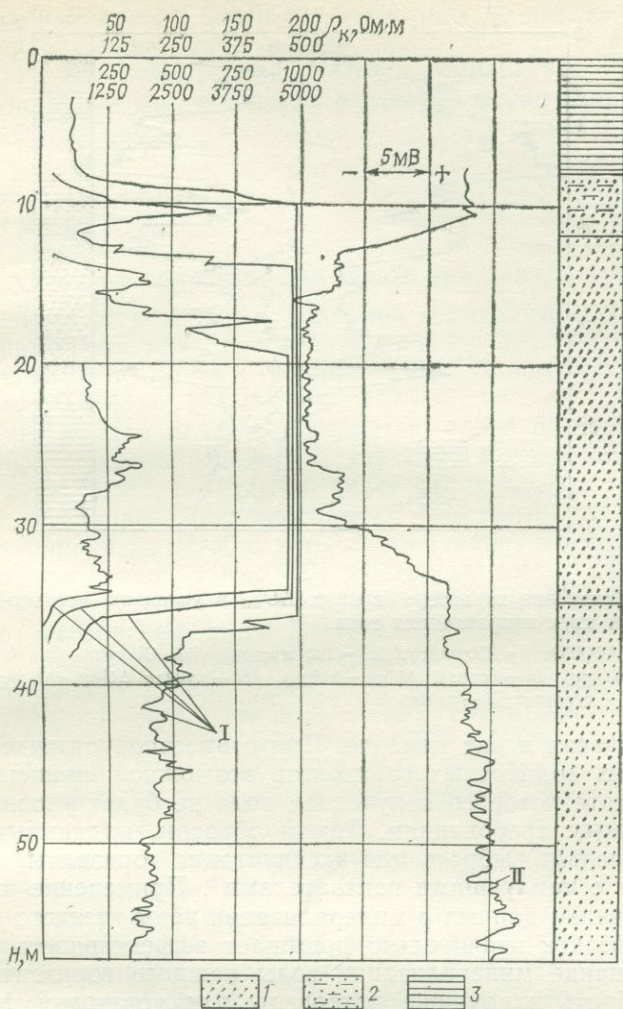


Рис. 23. Разделение сухих и водоносных песков по кривым КС и ПС. Скважина Ростовской области; $d_{\text{скв}} = 190 \text{ мм}$; $\rho_c \div 12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

I — кривая КС (зонд М1А0,1В), II — кривая ПС; 1 — песок; 2 — песок глинистый; 3 — глина

в разрезе скважины имеется несколько водоносных слоев, то исследование откачками каждого из них в отдельности затруднительно, а иногда практически невыполнимо, так как каждая установка фильтра уменьшает диаметр скважины, вынуждая увеличивать ее начальный диаметр и, таким образом, усложнять процесс бурения. Метод раздельного испытания горизонтов путем цементации затрубного пространства скважины применяют редко из-за сложности «оживления» горизонтов после

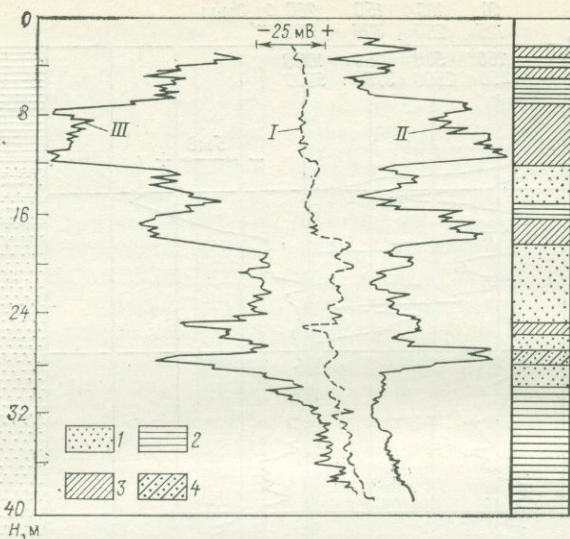


Рис. 24. Изменение характера кривых $\Delta U_{\text{ВП}}$ в условиях песчано-глинистого разреза при двух направлениях тока.

Зонд А0,04М0,04А2В; $I = 150$ мА; $d_{\text{СКВ}} = 100$ мм; $\rho_c = 7,5$ Ом·м.

I — кривая $\Delta U_{\text{ПС}}$, II — кривая $\Delta U_{\text{ВП}} - \Delta U_{\text{ПС}}$, III — кривая $\Delta U_{\text{ВП}} - \Delta U_{\text{ПС}}$; 1 — песок; 2 — глина; 3 — суглинок; 4 — супесь

проникновения в них цемента. При совместной откачке воды из нескольких водоносных горизонтов возможно смешение вод, в результате которого полученная вода не будет удовлетворять необходимым требованиям. Таким образом, по данным общей откачки нельзя выбрать для эксплуатации горизонты, содержащие воду с наилучшими показателями¹. Применение каротажа для получения данных о минерализации воды каждого водоносного горизонта значительно повышает эффективность исследований. Знание минерализации воды каждого горизонта позволяет выбрать наилучшие интервалы для установки фильтров, предотвратить ненужные откачки из горизонтов с непригодной водой и предусмотреть их изоляцию при оборудовании скважины фильтровой колонной.

Существуют два геофизических способа оценки общей минерализации воды в рыхлых породах.

Первый способ основан на использовании известной связи между удельным сопротивлением породы и удельным сопротивлением насыщающей ее воды ρ_v :

$$\rho_p = \rho_v P.$$

¹ В последнее время при бурении скважин для определения минерализации подземных вод начинают пользоваться специальными пробоотборниками [М. Н. Бильков и др., 1977 г.].

Зная $\rho_{\text{п}}$ и P , можно найти величину $\rho_{\text{в}}$, а по ней определить общую концентрацию солей в воде, пользуясь графиками из работы [11]. Величина $\rho_{\text{в}}$ приводится к температуре 18°. Зависимость удельного сопротивления растворов от температуры выражается формулой:

$$\rho_{\text{в}}^t = \frac{\rho_{\text{в}}^{18^\circ}}{1 + \alpha^t(t^\circ - 18^\circ)},$$

где $\rho_{\text{в}}^t$ — удельное сопротивление воды при температуре t °С; $\rho_{\text{в}}^{18^\circ}$ — удельное сопротивление воды при температуре 18 °С; α^t — температурный коэффициент электропроводности, который в общем случае можно принять равным 0,023. Только для соли NaHCO_3 $\alpha^t = 0,018$.

Величину $\rho_{\text{п}}$ для пластов мощностью более 3—4 м достаточно точно можно определить с помощью метода БКЗ.

Если речь идет о песках, то общее заключение о пригодности воды для водоснабжения можно составить, располагая только величиной $\rho_{\text{п}}$. Чтобы дать количественную оценку минерализации воды, необходимо еще иметь сведения о величине P . Опыт показывает, что часто минерализация воды в песках может быть установлена с приемлемой для практики точностью, если за P песков принимать его среднее статистическое значение. В общем случае оно равно 4. У тонкозернистых и глинистых песков оно составляет 3. В песках, содержащих воду повышенной минерализации ($\rho_{\text{п}}$ меньше 30—35 Ом·м), среднее значение P равно 5. Величина P нередко превышает 5 у уплотненных песков (как правило, допалеогенового возраста), что следует учитывать при определениях.

Относительное сопротивление водоносных песчаников колеблется в очень широких пределах (от 3 до 50). Поэтому при определении минерализации воды в песчаниках величину P находят по отношению $\rho_{\text{вп}}/\rho_{\text{с}}$. Это отношение определяют с помощью метода БКЗ, микрозондирования и измерений малыми потенциал- или градиент-зондами. Перечисленные методы подробно освещены в литературе [11, 19, 35].

Второй способ состоит в наблюдении за изменением диффузионно-адсорбционных потенциалов при смене минерализации фильтрата промывочной жидкости.

Для определения удельного сопротивления пластовой воды по кривой ПС может быть использована формула из работы [20]

$$\lg \rho_{\text{в}} = \frac{\Delta U_{\text{ПС}_2} \lg \rho_{\text{ф}_1} - \Delta U_{\text{ПС}_1} \lg \rho_{\text{ф}_2}}{\Delta U_{\text{ПС}_2} - \Delta U_{\text{ПС}_1}},$$

где $\Delta U_{\text{ПС}}$ — отклонение кривой ПС по отношению к «линии глин», $\rho_{\text{ф}}$ — удельное сопротивление фильтрата промывочной

жидкости, 1 и 2 — индексы, соответствующие первому и второму измерениям.

Опыты, проведенные в Кулундинской степи, показали, что метод обеспечивает точность определений порядка 20 % [20].

А. А. Козлов (1969 г.) предложил для песков обобщенную формулу, связывающую между собой величину ρ_v , амплитуду аномалии кривой ПС и удельное сопротивление породы ρ_p . Возможности этого метода ограничены, так как он применим только при условии, что минерализация пластовой воды больше минерализации фильтрата промывочной жидкости.

Определение емкостных характеристик и производительности водоносных горизонтов. Параметр P , как известно, является характеристикой емкостных свойств коллектора. С уменьшением пористости водоносной породы и усложнением структуры ее поровых каналов относительное сопротивление при прочих равных условиях возрастает. При исследованиях на нефть [11, 19] широко распространены формулы и эмпирические графики, связывающие P песков и песчаников с их пористостью k_p . Однако эти зависимости справедливы для пород, насыщенных минерализованными водами. На величину относительного сопротивления пород, содержащих пресные воды, оказывает ощутимое влияние поверхностная проводимость, которая в свою очередь, зависит от минерализации воды. В связи с этим для пресных вод зависимость $P = f(k_p)$ заметно усложняется. Тем не менее установлено, что для однородных песков с пористостью более 30 % зависимость $P = f(k_p)$ сохраняется такой же, как и в случае соленых вод. При этом указанная связь с достаточной точностью может быть выражена известной формулой Арчи:

$$P = \frac{1}{k_p^{1,3}}.$$

Если пески обладают меньшей пористостью или имеют в своем составе примеси глинистых или пылеватых частиц, то параметр P уже не может служить надежным показателем их водоотдачи.

У водоносных песчаников значения P чаще всего заключаются в пределах 10—30, уменьшаясь с ростом дебита водоносного горизонта. Если P больше 30, то песчаники отличаются малым дебитом; когда P превышает 50, они обычно практически безводны. Между тем пониженные значения P (от 3 до 10) встречаются как у водообильных, так и маловодных глинистых песчаников. Разделение этих пород возможно только с помощью других методов каротажа, в частности метода ГК.

В некоторых районах удается приближенно оценивать производительность водоносных горизонтов по полученным при каротаже значениям J_r или J_{nr} . Для решения этой задачи по результатам измерений, проведенных в ранее исследованных

скважинах, предварительно строятся эталонировочные графики $(J_{\Gamma} J_{\text{НГ}}) = f(q_1)$, выражающие зависимость одного из перечисленных выше параметров от удельного дебита q_1 , отнесенного к единице мощности водоносного слоя (или коэффициента фильтрации k_{Φ}).

Зависимость J_{Γ} от k_{Φ} часто имеет место у горизонтов, представленных песчано-глинистыми породами, и объясняется тесной связью водопроницаемости пород с содержанием в них глинистого материала, от которого существенно зависит также и величина J_{Γ} . С увеличением дебита величина J_{Γ} уменьшается.

Интенсивности естественного и нейтронного гамма-излучения при построении графиков рекомендуется представлять в виде соотношений $(J_{\Gamma_0} - J_{\Gamma})/J_{\Gamma_0}$ и $(J_{\text{НГ}_0} - J_{\text{НГ}})/J_{\text{НГ}_0}$, где J_{Γ_0} и $J_{\text{НГ}_0}$ — соответственно интенсивность естественного излучения против наиболее чистых глин и интенсивность нейтронного гамма-излучения против наиболее плотных, практически безводных пород. Представление параметров J_{Γ} и $J_{\text{НГ}}$ в относительных единицах позволяет исключить из рассмотрения характеристики аппаратуры и мощность нейтронного источника (при НГК). Графики $(J_{\text{НГ}_0} - J_{\text{НГ}})/J_{\text{НГ}_0} = f(q_1)$ строятся для определенных значений диаметра скважины $d_{\text{св}}$, так как от него сильно зависит величина $J_{\text{НГ}}$.

Для оценки производительности песчаных водоносных горизонтов применяют также резистивиметрию и расходомерию, которые могут выполняться только после обсадки скважины фильтровой колонной, и их данные уже не могут влиять на выбор типа, конструкции и интервалов расположения фильтров. Они проводятся только с целью определения оптимального режима эксплуатации уже выбранных водоносных горизонтов. Поэтому приведем их описание в разделе, посвященном скальным породам, где эти методы находят более широкое применение.

7.3. КАРОТАЖ СКВАЖИН, ПРОЙДЕННЫХ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

Литологическое расчленение разрезов и выделение водоносных горизонтов. При рассмотрении возможностей решения поставленной задачи методами каротажа геологические разрезы удобно разделить на три типа: а) разрезы, представленные изверженными породами, б) разрезы, включающие карбонатные отложения, и в) смешанные разрезы.

Скважины в скальных породах бурят как с чистой водой, так и с глинистым раствором. Мощные толщи скальных пород обычно проходят с промывкой водой.

Разрезы, представленные изверженными породами. Вода в изверженных породах циркулирует только по трещинам и сосредоточивается преимущественно в верхней, наиболее выветрелой зоне пород, которая обычно прикрыта сверху чехлом рых-

лых образований. Большие запасы воды часто бывают приурочены к ослабленным зонам и зонам тектонических разломов.

Данные геофизики дают возможность установить глубину залегания кровли коренных пород, обнаружить в них водоносные зоны и определить мощность и водонасыщенность коры выветривания. Наиболее уверенно эти задачи решаются при применении комплекса геофизических методов. При этом эффективность отдельных методов находится в зависимости от конкретных геологических и гидрогеологических условий.

Рассмотрим характер проявления изверженных пород на кротажных диаграммах в зависимости от их состава, состояния и степени обводненности.

Изверженные породы отличаются, как правило, весьма высокими удельными сопротивлениями, составляющими сотни и тысячи Ом·м. У водоносных пород они обычно ограничиваются пределами 150—600 Ом·м и лишь в случае очень пресных вод превышают эти значения. Относительные сопротивления водоносных изверженных пород чаще всего заключаются в диапазоне между 10 и 40. При прочих равных условиях они тем ниже, чем более водонасыщена порода. Однако у каолинизированных безводных пород значения R также малы и могут даже исчисляться единицами.

Переход от рыхлых пород к изверженным всегда сопровождается резким увеличением сопротивления на диаграммах КС. Резкость перехода несколько сглаживается при наличии выветрелой зоны, где сопротивления постепенно возрастают с приближением к коренному массиву. Кривые КС в изверженных породах сильно иззубрены. При этом пониженные сопротивления обычно отвечают трещиноватым зонам, которые могут быть как водоносны, так и заполнены вторичным глинистым материалом. Сильно пониженными сопротивлениями характеризуются также породы, содержащие минералы с электронной проводимостью, например сульфиды, соединения железа и др. Таким образом, пониженные сопротивления не всегда связаны с водоносностью пород, хотя в общем случае они являются одним из важнейших ориентиров при поисках воды.

На кривых ПС кровля изверженных пород большей частью прослеживается по снижению потенциала. Внутри массива пород также нередко наблюдаются скачки кривой ПС в направлении уменьшения потенциала, связанные с ожелезненными трещинами, к которым иногда бывает приурочена вода. Протяженные аномалии кривой ПС чаще объясняются литологическими особенностями пород.

Дифференциация кривых ВП в изверженных породах обусловлена изменениями как состава, так и состояния пород. Например, отмечено сильное снижение поляризуемости при переходе к каолинизированным разностям. В то же время у водоносных трещиноватых пород поляризуемость также понижена.

Диаграммы J_{Γ} служат главным образом для разделения пород по петрографическим признакам. Наиболее высокой радиоактивностью обладают кислые породы, в частности граниты. Основные породы менее радиоактивны. По сравнению с осадочными отложениями изверженные породы могут характеризоваться как повышенной, так и пониженной радиоактивностью. Повышенная радиоактивность наблюдается тогда, когда поверхностные отложения являются конечным продуктом распада изверженных пород, а пониженная, когда кристаллические породы (в особенности основные) перекрыты глинистыми отложениями морского генезиса. Для коры выветривания и ослабленных зон характерно небольшое уменьшение J_{Γ} .

На кривых $J_{\text{НГ}}$ изверженные породы обнаруживаются по очень высоким значениям параметра. Против водоносных зон наблюдаются минимумы $J_{\text{НГ}}$. По показаниям метода удается уверенно разделять разрушенные породы с водоносными и сухими трещинами. Последние проявляются так же, как и монолитные породы. В то же время трещины, кольматированные глинистым материалом, практически не отличимы от водоносных.

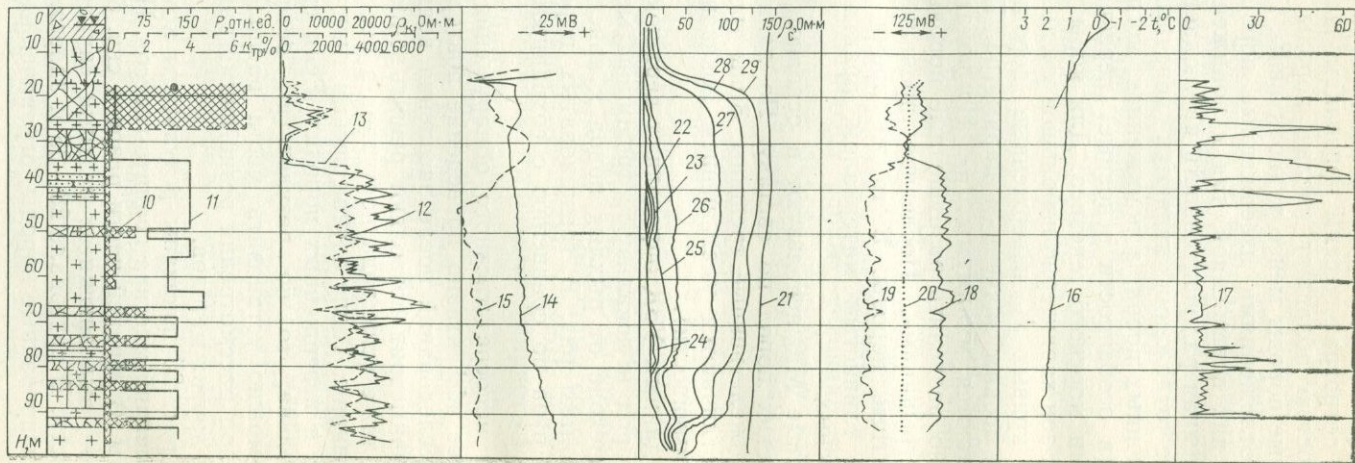
Кривые МК используют в основном для расчленения магматических пород по составу. По данным метода фиксируют также ожелезненные трещины. Зоны трещиноватости, как правило, отличаются уменьшением показаний метода (магнитной восприимчивости).

По данным УЗК определяют верхнюю границу кристаллических пород и локализуют трещиноватые участки. Скорость v_{p} при переходе от рыхлых пород к кристаллическим возрастает в несколько раз. В трещиноватых породах она уменьшается в 2—3 раза по сравнению с сохранными (А. И. Савич и др., 1969 г.).

Для непосредственного обнаружения мест скопления воды наиболее эффективно проведение повторных резистивиметрических исследований после засоления воды в скважине. Данные резистивиметрии позволяют решить вопрос о водоносности скважины, даже если вода поступает в нее только из одной крупной трещины. Такие случаи весьма типичны для скважин, пройденных в изверженных породах. Если скорость подземных вод значительна, то по результатам резистивиметрии довольно точно можно установить места расположения притоков, особенно при рассмотрении резистивимограмм совместно с результатами других методов.

На рис. 25 показаны результаты комплексных каротажных исследований массива гранито-гнейсов. По составу породы неоднородны. В верхней части разреза скв. 69 имеются три прослоя гранитов, выделяющиеся резкими «пиками» магнитной восприимчивости. В интервале 28—33 м залегают сильно разрушенные заглинизированные породы, ограниченные четкими минимумами

Скв. 69



кривых КС и ВП. Высокие значения КС, колеблющиеся в пределах 10 000—25 000 Ом·м, свидетельствуют о безводности основного массива и возможности циркуляции воды лишь на отдельных узколокализованных участках, где относительные сопротивления меньше 50. Это положение хорошо подтверждается результатами резистивиметрии. По данным этого метода выявлены три слабых водопритока, приуроченные к минимальным значениям относительного сопротивления, на глубинах 50, 80 и 92 м [29].

Иной характер имеет каротажная диаграмма по скв. 67 (см. рис. 25), также снятая в гранито-гнейсах. Но здесь гранито-гнейсы сильно каолинизированы, в особенности на участке 72—100 м, где значения КС составляют 500 Ом·м и менее. Каолинизированные участки очень четко фиксируются минимумами и на кривой ВП. Кроме того, для них характерны очень низкие относительные сопротивления (менее 5). Вопрос о водоносности скважины решили только с помощью резистивиметрии. По ее данным был обнаружен очень слабый приток воды с глубины 58—70 м, перетекающей в трещину на глубине 110 м.

Разрезы, содержащие карбонатные породы. Вода в карбонатных породах сосредоточивается в основном в трещинах, поэтому водообильность данных пород определяется главным образом степенью трещиноватости. По условиям залегания воды в карбонатных породах разделяются на трещинные и трещинно-пластовые. Особенности залегания вод накладывают отпечаток на характер каротажных диаграмм и на задачи исследований. В первом случае задача сводится к выделению в сплошном массиве однородных карбонатных пород (чаще всего известняков) наиболее трещиноватых водообильных зон. Во втором случае задача состоит в литологическом расчленении разреза, выделении в нем карбонатных пород и оценке их водоносности.

Рассмотрим особенности каротажных диаграмм в том и другом случае и основные признаки, служащие для выделения в разрезе разных типов карбонатных пород и локализации в них коллекторов воды.

Удельное и относительное сопротивление *известняков и доломитов* изменяется примерно в тех же пределах, что и у песчаников, и практически зависит от тех же факторов. Для пород, насыщенных пресной водой, наиболее характерны удельные сопротивления в пределах 75—250 Ом·м. На кривых КС известняки и доломиты, залегающие среди глин, во всех случаях отмечаются четкими максимумами сопротивлений. На общем фоне высоких сопротивлений минимальными КС выделяются трещиноватые водонасыщенные зоны и глинистые разности известняков. Наиболее высокими сопротивлениями обладают кристаллические и кремнистые известняки. Сравнительно низкие сопротивления присущи ракушечникам и кавернозным известнякам.

Графики БКЗ, соответствующие сильно трещиноватым водоносным известнякам, имеют обычно трехслойный характер типа $\rho_c < \rho_{\text{зп}} < \rho_{\text{п}}$, причем промежуточный слой часто проявляется на них очень отчетливо, что дает возможность уверенно определять $\rho_{\text{зп}}$, а отсюда и величину P .

Одиночные пласты известняков и доломитов среди глин проявляются на диаграммах ПС, J_{Γ} и $J_{\text{нг}}$ практически так же, как и песчаники. В сплошном массиве однородных известняков кривые ПС и ГК не выразительны. Зато при наличии в массиве глинистых известняков, мергелей или отдельных прослоев глин роль методов ПС и в особенности ГК, резко возрастает. При совместном рассмотрении кривых J_{Γ} и $J_{\text{нг}}$ наиболее перспективные на воду участки фиксируются по пониженным значениям обоих параметров.

Известняки и доломиты обнаруживаются по повышенной поляризуемости на кривых ВП, причем доломиты обычно отличаются большей длительностью спада $\Delta U_{\text{вп}}$. Это свойство также можно использовать в поисковых целях.

Участки кавернозных известняков отчетливо отмечаются на кавернограммах по увеличенному диаметру скважин.

Скорости v_p в известняках варьируют от 2,3 до 6 км/с. Трещиноватые, кавернозные и глинистые известняки отличаются пониженными показаниями на диаграммах УЗК (А. И. Савич и др., 1969 г.).

При изучении водоносности мощных толщ известняков часто ведущим поисковым методом является резистивиметрия. Однако детальное изучение разреза этим методом затруднительно, так как разобоченные, близко расположенные притоки воды, как правило, сливаются на резистивограммах в единую аномалию, а разделяющие их прослои водоупорных пород не проявляются. Детализация разреза по данным резистивиметрии тем труднее, чем меньше естественный расход водоносных горизонтов. Отчетливо устанавливается по кривым лишь нижняя граница водоносных пород; верхняя же их граница, особенно при невысокой скорости фильтрации подземных вод, отмечается на резистивограммах крайне расплывчато. Поэтому данные резистивиметрии следует рассматривать в совокупности с результатами других методов каротажа.

Мергели на кривых КС проявляются средними значениями сопротивлений, чаще всего заключающимися между 10 и 50 Ом·м. Графики БКЗ в мергелях имеют всегда двухслойный характер. На кривых ПС мергели выделяются по отсутствию отклонений от «линии глин», на кривых ВП они имеют более высокие показания, чем глины. По величине J_{Γ} мергели занимают промежуточное положение между известняками и глинами. На диаграммах $J_{\text{нг}}$ они отмечаются средними показаниями, увеличивающимися с уплотнением породы. Диаметр скважины в мергелях равен номинальному.

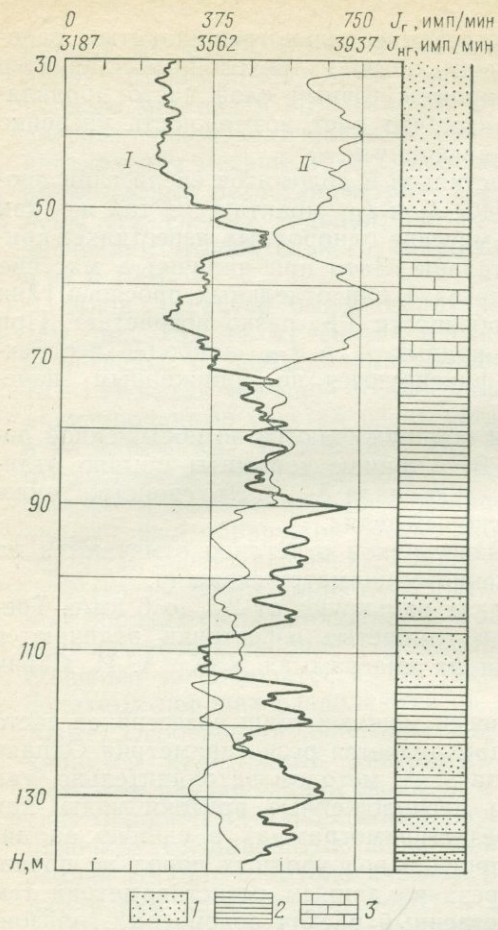


Рис. 26. Выделение известняков среди глин по кривым $J_{Г}$ и $J_{НГ}$. Скважина в Одесской области (диаметр скважины $d_{скв}$ до 57 м — 295 мм, ниже — 245 мм).
 I — кривая $J_{Г}$; II — кривая $J_{НГ}$; 1 — песок; 2 — глина; 3 — известняк

Удельное сопротивление мела, насыщенного пресной водой, изменяется в диапазоне 25—150 Ом·м. Мел, содержащий пресную воду, при залегании среди глин всегда выделяется на кривой КС повышенными сопротивлениями. Графики БКЗ в пластах водонасыщенного мела обычно имеют трехслойный характер типа $\rho_c < \rho_{зл} < \rho_{п}$.

На кривых микрозондов, ПС, $J_{Г}$ и кавернограммах мел отмечается так же, как и известняки, на кривых ВП и НГК выделяются пониженными показаниями.

На рис. 26 показан типичный пример локализации известняков по кривым $J_{Г}$ и $J_{НГ}$.

Смешанные разрезы. В смешанных разрезах коллекторами воды могут быть одновременно песчаные, карбонатные и другие породы. Сюда же относятся и разрезы, представленные чередованием различных метаморфических пород. Интерпретация диаграмм начинается с детального литологического расчленения разреза. Данные

каротажа тщательным образом сопоставляются с описанием образцов керна или шлама. При оценке водоносности пород руководствуются правилами, установленными для соответствующих коллекторов.

Каротажные диаграммы, снятые в скважинах, где наблюдается переслаивание различных метаморфических пород (аргиллитов, алевролитов, песчаников, известняков, сланцев и т. д.), особенно трудны для интерпретации. Геологические разрезы такого типа широко распространены в Северном Казахстане.

Вода здесь приурочена главным образом к трещинам, а водо-вмещающими породами чаще всего служат песчаники и известняки. Однако иногда водоносность может быть связана и с другими породами: сланцами, алевролитами и др. Каротажные диаграммы, отвечающие подобным разрезам, отражают как литологические переходы, так и изменения в степени сохранности пород, что затрудняет их расшифровку.

Величина удельного сопротивления водоносных метаморфических пород в зависимости от степени их трещиноватости, литологии коллектора и минерализации воды изменяется от 50 до 500 Ом·м. Глинистые разности пород в тех же условиях обладают меньшими сопротивлениями, чем водоносные породы, плотные же безводные породы, наоборот, — более высокими. Однако эта общая закономерность не всегда выдерживается, и в некоторых случаях удельное сопротивление водоносных пород оказывается ниже, чем у плотных глинистых образований. На кривых ПС аномальными значениями потенциала отмечаются преимущественно песчаники и известняки, причем независимо от их водоносности.

На диаграммах радиоактивных исследований водоносные породы проявляются относительно низкими интенсивностями как естественного, так и нейтронного гамма-излучения. Против глинистых разностей пород наблюдаются обычно повышенные J_{Γ} и пониженные $J_{\text{НГ}}$. Плотные же породы отличаются, наоборот, высокими $J_{\text{НГ}}$ и низкими J_{Γ} .

Горизонты, перспективные на воду, отмечаются на каротажных диаграммах средними величинами сопротивлений (от 50 до 500 Ом·м), часто заметными отклонениями кривой ПС от «линии глин» и сравнительно низкими значениями интенсивности естественного и нейтронного гамма-излучения. Дополнительную информацию могут дать УЗК и кавернометрия.

Определение минерализации подземных вод. Определение минерализации подземных вод, циркулирующих в трещиноватых породах, можно производить тремя способами: а) непосредственным измерением удельного сопротивления воды в скважине с помощью резистивиметра, б) путем отбора проб воды специальными пробоотборниками и в) по величине относительного сопротивления пород R . Первыми двумя методами пользуются при бурении скважин с промывкой чистой водой.

Резистивиметрия дает особенно хорошие результаты, когда минерализация воды не меняется по разрезу. В противном случае целесообразно отбирать пробы воды пробоотборником, подсоединенным к каротажному кабелю. Достоинством работы с таким пробоотборником является то, что места отбора проб имеют точную привязку по глубине и, таким образом, легко коррелируются с каротажными диаграммами. В настоящее время ВНИИГИСом разработан опробователь ОПГ-4-9, введенный в производство при гидрогеологических исследованиях

(межзернистой) пористостью, а по оси ординат — относительные сопротивления P той же породы, но при наличии в ней водоносных трещин. Величина $k_{тр}$ находится по модулю кривой палетки, проходящей через точку с координатами P и P_m . За параметр P_m принимают самую большую величину относительного сопротивления, встреченную в разрезе скважины. Пример построения графика трещиноватости по разрезу скважины с помощью данной палетки приведен на рис. 25.

Количественную характеристику трещиноватости можно получить также с помощью УЗК.

Наиболее полную информацию о фильтрационных характеристиках пород и гидродинамическом режиме водоносных горизонтов получают при интерпретации результатов резистивиметрии и расходомерии.

Модификация резистивиметрии, применяемая для определения производительности водоносных горизонтов, сводится к повторным измерениям удельного сопротивления ρ_c раствора в скважине после его засоления. Анализ кривых ρ_c сводится к наблюдению за характером опреснения раствора. В общем случае о картине опреснения судят по суммарному действию двух составляющих скорости потока: по направлению течения и по оси скважины.

При отсутствии осевой составляющей потока, что соответствует случаю, когда скважиной вскрыт один водоносный горизонт или несколько разобобщенных водоносных зон с одинаковым статическим уровнем, задача сводится к выявлению мест фильтрации подземных вод через стенки скважины и послойному определению скоростей фильтрации.

Метод определения скоростей фильтрации подземных вод по данным резистивиметрии предложен Н. А. Огильви и детально разработан И. И. Гринбаумом [34].

Расчеты скоростей фильтрации U_ϕ производят по формуле

$$v_\phi = \frac{1,81r}{t_2 - t_1} \lg \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0},$$

где r — радиус скважины, м; C_0 — естественная минерализация подземных вод, г/л; C_1, C_2 — концентрации раствора в скважине, соответствующие моментам времени t_1 и t_2 , мин.

Концентрацию солей в воде находят по графикам зависимости удельного сопротивления растворов от концентрации с учетом химического состава и температуры воды.

Найденные скорости фильтрации иллюстрируют картину относительного распределения водопроницаемости пород по глубине. При наличии вертикальной составляющей скорости потока расчетные значения v_ϕ получаются заниженными.

Если скважиной вскрываются два или более водоносных горизонтов с разными статическими уровнями h_i , то в скважине устанавливается объединенный статический уровень h_0 . Интер-

претация результатов резистивиметрии сводится в этом случае к выделению в разрезе водоотдающих, водопоглощающих и водоупорных интервалов пород и определению их границ и частных дебитов Q_i водоотдачи или водопоглощения.

Характер опреснения раствора и общий вид кривых ρ_c зависят от соотношения горизонтальной и вертикальной составляющих скоростей потока. Если горизонтальная составляющая скорости потока значительно превышает вертикальную, то между пресным и соленым раствором довольно быстро образуется четкий водораздел, передвигающийся со временем в сторону поглощающего горизонта (рис. 28). Скорость перемещения границы растворов совпадает с осевой составляющей W скорости потока и может быть вычислена по отношению

$$W = \frac{\Delta h_i}{\Delta t_i},$$

где Δh_i — интервал (м) между соседними кривыми ρ_c , снятыми через промежуток времени Δt_i (мин).

От значений W переходят к объемным расходам воды Q через поперечное сечение скважины:

$$Q = \frac{\pi d^2 W}{4},$$

где d — диаметр скважины, см.

По полученным данным строят расходограмму $Q=f(h)$.

При наличии осевой составляющей скорости потока наиболее полную информацию о фильтрационных свойствах пород

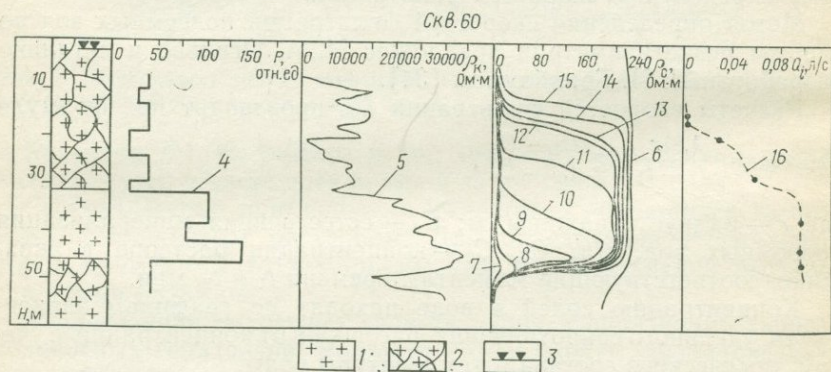


Рис. 28. Выделение и изучение водоносного горизонта по скв. 60 в зоне БАМ.

Глубина забоя — 60 м; обсадные трубы до глубины 9 м; диаметр скважины: до 9 м — 219 мм, от 9 до 11,25 м — 168 мм, ниже — 145 мм, $Q = 12$ л/с при понижении уровня воды S до 23,5 м.

1 — гранит; 2 — гранит трещиноватый; 3 — объединенный статический уровень; 4 — график относительного сопротивления P ; 5 — кривая КС, зонд М1,0А0,1В; резистивмограммы: 6 — до засоления воды, 7 — сразу после засоления, 8 — через 5 мин, 9 — через 12 мин, 10 — через 25 мин; 11 — через 1 ч, 10 мин., 15 — через 8 ч, 30 мин.; 16 — расходограмма, построенная по данным резистивиметрии

можно получить по данным расходомерии (с расходомерами) [6, 9 и др.]. Результатом наблюдений по методу расходомерии также является расходограмма $Q=f(h)$.

Пользуясь расходомерией, можно установить удельные дебиты q_i и статические уровни h_i всех пройденных скважиной водоносных горизонтов независимо от их количества, только при одном возбуждении скважины.

Так, имея две расходограммы, одна из которых снята при отсутствии возбуждения скважины, а другая при наливе или откачке, для каждого i -го горизонта можно получить два расхода Q_1 и Q_2 , соответствующие двум динамическим уровням $H_1=h_0$ и H_2 , где h_0 — объединенный статический уровень.

Отсюда

$$q_i = \frac{Q_1 - Q_2}{H_2 - H_1}.$$

Для определения h_i строят графики изменения Q_i в зависимости от H_i . Считая зависимость $Q=f(H)$ линейной, искомую величину h_i находят по ординате точки пересечения графика $Q=f(H)$ с осью H [35].

7.4. КАРОТАЖ СКВАЖИН, ПРОЙДЕННЫХ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

При проведении гидрогеологических исследований в районах распространения вечной мерзлоты перед каротажем ставятся некоторые специфические геокриологические задачи. При поисках и разведке подмерзлотных вод к их числу прежде всего относится задача определения нижней границы мерзлоты. Наиболее надежно эта задача решается для рыхлых низкотемпературных пород. Значительно сложнее выделяются высокотемпературные мерзлые рыхлые и особенно скальные породы, мало отличающиеся по своим свойствам от тех же пород в талом состоянии. Это обстоятельство заставляет привлекать к решению данной задачи комплекс методов. В число их входят термометрия, метод сопротивлений в модификациях КС и БКЗ, метод ПС, УЗК и кавернометрия. Рассмотрим в отдельности возможности каждого из этих методов для решения поставленной задачи.

На термограммах, снятых при тепловом режиме, близком к установившемуся, переход от мерзлых пород к талым сопровождается заметным увеличением геотермического градиента и смещением температурной кривой из области отрицательных температур в область положительных.

Если тепловой режим нарушен, скачок градиента температур при пересечении границы мерзлоты проявляется менее отчетливо. Кроме того, при неустановившемся тепловом режиме вся температурная кривая часто располагается в области положительных температур.

При регистрации температурной кривой после оттаивания скважины возможен и такой случай, когда геотермический градиент в зоне мерзлых пород оказывается больше, чем в талых породах (см. рис. 25). Но и здесь точка перегиба термограммы обычно служит указателем положения нижней границы мерзлоты.

Пример определения нижней границы мерзлоты по температурной кривой приведен на рис. 29 (Б. В. Володько, 1976 г.).

Если в скважине имеется переток воды из одного горизонта в другой, причем один из них расположен выше мерзлой толщи, а другой — ниже, то интервал скважины между сообщающимися горизонтами будет представлен на термограмме участком практически постоянной температуры. В таких условиях определение нижней границы мерзлоты по данным термометрии становится невозможным.

Метод КС, по мнению большинства исследователей, не является достаточно надежным для разделения мерзлых и талых пород. Опыт показывает, что на кривой КС переход от мерзлых к талым породам сопровождается заметным уменьшением сопротивления особенно тогда, когда низкотемпературная мерзлая

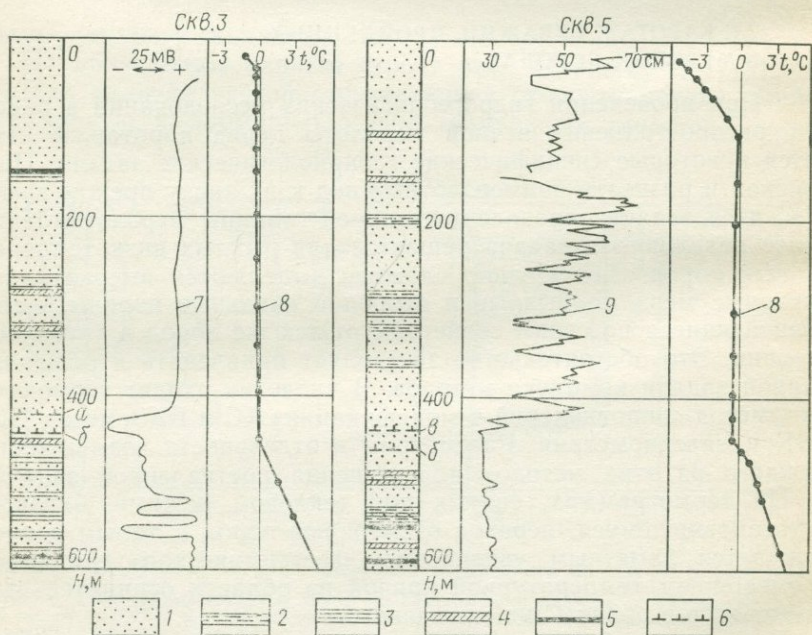


Рис. 29. Графики ПС, температуры и кавернометрии в мерзлых и талых породах по скважинам Средне-Вилуйской площади (по Б. В. Володько, 1976 г.). 1 — пески; 2 — аргиллиты; 3 — глины; 4 — алевролиты; 5 — уголь; 6 — нижняя граница мерзлоты по данным: а — ПС, б — термометрии, в — кавернометрии; 7 — кривая ΔU ПС; 8 — температурная кривая; 9 — кавернограмма

толща подстилается тальми породами, насыщенными минерализованными водами (Н. А. Ирбэ, 1973 г., Л. М. Мarmorштейн, Б. В. Володько и др., 1950 г.).

Интересные результаты получены с помощью метода ПС (Б. В. Володько, 1976 г.). Установлено, что в мерзлых породах кривая ПС практически не дифференцируется. При переходе же к тальм породам, особенно терригенным, на кривой ПС наблюдается скачок потенциала в ту или другую сторону, измеряемый иногда десятками милливольт (рис. 29, 30). Ошибки при применении этого метода возможны, если скважина находится в сильно растепленном состоянии. Тогда и в мерзлой толще иногда появляются значительные аномалии ПС.

Обнадеживающие результаты получены в последние годы с применением метода УЗК (А. Г. Скворцов, 1977 г., и др), особенно при изучении песчано-глинистых пород. В то же время при высокотемпературной мерзлоте нижнюю границу ее удаётся надёжно фиксировать только в грубозернистых отложениях.

На рис. 29 показан пример разделения мерзлых и тальм пород по кавернограмме. Установлено (Б. В. Володько, 1976 г.; А. М. Мусин, 1977 г.), что при бурении мерзлых пород диаметр скважины резко меняется вследствие вытаивания льдистых образований, в то время как в тальм породах он сохраняется сравнительно постоянным. Особенно часто такая картина наблюдается в песчано-глинистых породах.

Наиболее трудной является задача выявления нижней границы высокотемпературной мерзлоты в разрезах, где преобладают глинистые породы. А. Н. Макаров, Л. М. Мarmorштейн и П. Д. Сиденко (1959 г.) считают целесообразным применять

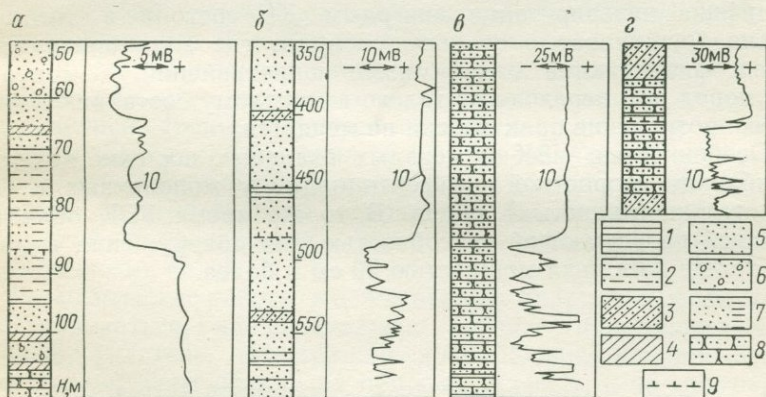


Рис. 30. Изменение электрического потенциала на границе мерзлых и тальм пород (по Б. В. Володько и Г. М. Звереву, 1976 г.).

а — п. Маган; *б* — п. Кытыл; *в* — п. Орто-Сурт; *г* — п. Магарас.

1 — глины; 2 — глины песчаные; 3 — алевролиты; 4 — алевроиты; 5 — песок; 6 — песок с глиной; 7 — песок с прослоями глины; 8 — песчаник; 9 — граница тальм и мерзлых пород по характеру изменения электрического потенциала; 10 — кривые $\Delta U_{ПС}$

в этом случае комплекс методов — КС, ПС, БКЗ, термометрию и кавернометрию.

Кривые БКЗ в мерзлых породах за счет зоны растепления приобретают часто трехслойный характер с соотношением сопротивлений $\rho_c < \rho_{\text{эл}} < \rho_{\text{пл}}$. Это может служить дополнительным критерием для опознания мерзлых пород.

Следующей задачей, стоящей перед каротажем, является литологическое расчленение мерзлых толщ, выделение в них трещиноватых зон, изучение льдистости пород и выявления отдельных пластов и жил льда.

Для каротажа мерзлых пород практически применимы все методы, которые используют при каротаже талых пород.

Расчленение мерзлых песчано-глинистых разрезов может удовлетворительно производиться по данным методов КС, ВП, УЗК и ГК. Общий характер дифференциации кривых КС, ВП и ГК остается таким же, как в талых породах, однако фоновые значения КС в мерзлых породах в несколько раз возрастают по сравнению с фоновыми значениями талых и тем больше, чем ниже температура пород и выше их льдистость. Весьма ценную информацию дает ультразвуковой каротаж, позволяющий разделять терригенные породы в зависимости от их гранулометрического состава. А. Г. Скворцову (1977 г.), проводившему исследования в северной части Западной Сибири, удалось установить четкую, практически линейную зависимость скорости волн v_p от процентного содержания в породе глинистых частиц и в соответствии с этим разбить породы на категории от песка до легкого суглинка.

При литологическом расчленении мерзлых скальных пород специфика интерпретации диаграмм КС состоит в том, что сильно трещиноватые скальные породы, где вода превращена в лед, фиксируются максимумами сопротивлений. У монолитных пород при переходе от талого к мерзлому состоянию удельное сопротивление практически не меняется.

Особенностью УЗК в мерзлых скальных породах является ослабление скоростной дифференциации у монолитных и трещиноватых (льдистых) пород. В то же время УЗК обладает хорошей разрешающей способностью для обнаружения в мерзлой толще жил льда мощностью 20 см и более.

8. ПЕРСПЕКТИВЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЦЕЛЯХ ОХРАНЫ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В СВЯЗИ С ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Использование подземных вод для питьевого и хозяйственного водоснабжения связано с активным вмешательством человека в естественную природную среду: меняется уровень подземных вод, наблюдается перераспределение между поверхностным и подземным стоками, происходит проседание земной поверхности и т. п. Резкое, как правило, отрицательное воздействие на водоснабжение оказывают промышленные и горнорудные предприятия, а также различные сельскохозяйственные объекты (массивы орошаемого земледелия, животноводческие фермы и др.): они способствуют загрязнению, а иногда и истощению запасов подземных вод [27].

Для ликвидации или уменьшения масштабов столь нежелательных явлений применяется ряд мер: целенаправленно изучаются естественные гидрогеологические условия в районе проектируемых водозаборов и представляющие для них опасность промышленные и сельскохозяйственные предприятия, на основе чего устанавливается наиболее благоприятное их расположение и определяются специальные защитные инженерные мероприятия; осуществляется контроль за изменением состояния подземной гидросферы в районе действующих водозаборов и промышленных и сельскохозяйственных объектов; производится искусственное восполнение запасов подземных вод [29].

Геофизические исследования, ориентированные на охрану окружающей среды, являются новым направлением в гидрогеологии. Такие работы пока немногочисленны, но они свидетельствуют о высокой эффективности, а следовательно, и перспективности исследований, основанных на соответствии резких изменений геологической среды аналогичным изменениям геофизических полей.

Геофизические работы в целях охраны природной среды могут ориентироваться: на специальное разовое гидрогеологическое изучение участков, где отражается наибольшее влияние производственной деятельности на природную среду, и на многократные наблюдения в целях контроля за изменением гидрогеологических условий. В работах первого направления используются те же методы и способы решения гидрогеологических задач, что и при исследованиях, применяемых при поисках и разведке подземных вод. Методика работ по второму направлению является, по существу, одним из приемов гидрорежимных наблюдений. Эти работы проводятся в целях оперативного выявления

существенных изменений во времени гидрогеологических процессов (или параметров), имеющих важное значение для оценки месторождения подземных вод и его эксплуатации. Исследования носят циклический характер и продолжительны во времени — иногда до года и более. При этом изучаются изменения геологической среды, происходящие в зависимости от естественных преобразований природных условий, или от производственной деятельности человека.

К числу гидрорежимных исследований, решение которых может осуществляться с помощью геофизических методов, следует отнести выявление техногенных изменений направления и скорости подземного потока, фильтрационных свойств грунтов, уровня грунтовых вод, состояния водонасыщенных пород, степени минерализации подземных вод, положения границы, разделяющей пресные и минерализованные воды, температуры и радиоактивности подземных вод, мерзлотного состояния пород.

Методика геофизических исследований при гидрорежимных наблюдениях в большинстве случаев такая же, как и при обычных работах. Ее особенность заключается в высокой точности наблюдений и постановке эксперимента таким образом, чтобы фиксировалось лишь изменение геофизических полей, связанных с исследуемой гидрогеологической характеристикой, а все остальные аномалии, являющиеся фоновыми, оставались бы без изменения. Вследствие этого в наибольшей мере изучаются качественные геофизические характеристики, в то время как количественные расчеты используются довольно редко. Для наибольшей однозначности результатов гидрорежимные геофизические наблюдения производятся в строго фиксированных на местности пунктах с помощью одних и тех же измерительных установок. Исследования концентрируются на участках, где располагаются наибольшие изменения среды, причем наблюдения могут быть точечными, профильными или площадными. Соответствующим образом выбирается и время наблюдений.

Наибольшей чувствительностью при глубинных режимных наблюдениях отличаются скважинные гидрогеологические и каротажные методы, но в силу малого числа скважин их следует дополнять наземными геофизическими работами. Скважинные наблюдения можно использовать как опорные и контрольные пункты. В наибольшей мере гидрорежимные наблюдения можно проводить в период эксплуатации месторождений. Однако целесообразно такие исследования начинать уже с поисково-разведочных работ для изучения естественных ненарушенных условий среды.

Среди наземных геофизических методов при гидрорежимных наблюдениях наибольшее применение получила электроразведка, позволяющая в большинстве случаев качественно, а иногда

и количественно решить многие из перечисленных задач. Для решения более узкого круга задач могут привлекаться сейсмо-разведка, термометрия, радиометрия, возможно, и высокоточные гравиметрические и микромагнитные наблюдения. При каротаже скважин используется обычный набор геофизических методов.

8.1. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ВОДОЗАБОРОВ, ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРНОРУДНЫХ И ДРУГИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В районе действующих водозаборов и в зоне питания эксплуатируемых горизонтов целесообразно с помощью геофизических методов: 1) определять конфигурацию образующейся вокруг водозабора депрессионной воронки; 2) изучать гидро-геологическую связь поверхностных и подземных вод; 3) выявлять движение (подсос) соленых природных вод, промышленных стоков и грязных сточных вод в сторону водозабора; 4) контролировать мерзлотное состояние пород в зоне водозабора. Это наиболее важные задачи.

Геофизические работы, выполненные на этапе поисков и предварительной разведки, позволяют в общих чертах ответить на эти вопросы, поскольку геофизическая информация вместе с данными бурения дает возможность составить приближенную фильтрационную модель месторождения и сделать соответствующий многолетний прогноз. Однако прогноз, подготовленный даже самым тщательным образом, нуждается в корректировке, которую можно осуществить на стадии детальной и эксплуатационной разведки¹. Особенности этих исследований рассматриваются ниже.

Определение конфигурации депрессионной воронки позволяет выявить площадь, в наибольшей мере подверженную загрязнению. В пределах этой площади под воздействием водозабора происходят нежелательные инженерно-геологические и другие процессы. При эксплуатации безнапорных вод депрессионную воронку можно сравнительно легко оконтурить обычными приемами. Значительно труднее изучать депрессию в пьезометрическом уровне напорных вод. Использование геофизических методов в этих условиях, видимо, возможно, причем решения могут быть как прямыми, так и косвенными. Прямое решение связано с контролем за изменением физических полей в зоне депрессии. В этом отношении, по-видимому, целесообразно использование высокоточных гравиметрических и магнитометри-

¹ Помимо исследований в районе действующих водозаборов, аналогичные работы проводятся в зоне горнорудных и промышленных предприятий и других источников загрязнения. По существующему положению последние работы возложены на соответствующие предприятия и здесь специально не рассматриваются. По своему характеру они приближаются к исследованиям, проводимым вблизи водозаборов.

ческих и сейсмических режимных наблюдений. Действительно, длительная эксплуатация водозаборов приводит к сокращению объема воды в зоне его воздействия и уменьшению значений силы тяжести. Аналогичная картина наблюдается в районе эксплуатации нефтяных месторождений. С другой стороны, длительная откачка подземных вод способствует уменьшению упругих запасов подземных вод и может привести к соответствующему изменению упругого состояния пород, что, как известно, отражается на магнитных и упругих полях [8, 32]. Косвенное решение связано с длительным изучением по геофизическим материалам разреза месторождения и использованием этих данных при составлении фильтрационной схемы и последующего моделирования нестационарного фильтрационного потока.

Изучение гидравлической связи поверхностных и подземных вод. С этой целью проводится детальное литологическое расчленение верхней части разреза, включая зону аэрации и подстилающие ее водоупорные толщи. Особое внимание уделяется локальным и региональным водоупорам, представленным обычно глинистыми породами. Наиболее тщательно исследуются современные и древние (погребенные) речные долины, зоны разломов, не прикрытые глинистыми породами участки повышенной трещиноватости и закарстованности и т. п., т. е. все те участки, где может осуществляться интенсивная гидравлическая связь поверхностных и подземных вод. При исследовании современных долин изучается также живое русло реки с целью характеристики фильтрационных свойств донных пород. Для решения названных частных задач используются методы электроразведки (ВЭЗ, ЭП, ВЭЗ-ВП, ЗСБЗ) и сейсморазведки (МПВ, КМПВ, реже МОВ). Особенно перспективными для выделения маломощных водоупоров среди проницаемых пород являются методы сейсморазведки и ЗСБЗ. Параллельно с литологическим расчленением разреза определяются уровень грунтовых вод, направление и скорость подземного потока, учитываются контуры областей питания и разгрузки подземных вод. Для этого привлекаются сейсморазведка МПВ, ВЭЗ, МЗТ, ЭП, резистивиметрия и термометрия.

Изучение движения соленых природных подземных вод и промышленных стоков. Промышленные стоки, как и соленые природные воды, отличаются повышенной минерализацией. Проследить движение контура, отделяющего пресные воды от вод с повышенной минерализацией, не трудно, если воды существенно отличаются по степени минерализации. Обычно полевые и скважинные методы электроразведки позволяют разрешить эту задачу.

Иногда промышленные стоки не отличаются аномальной электрической проводимостью, но характеризуются повышенной температурой или радиоактивностью. Обнаружить продвижение такого «облака» можно с помощью скважинных наблюдений,

применяя термометрические и радиометрические методы. Опыт использования наземных методов для обнаружения таких аномалий отсутствует. Видимо, они не перспективны. Однако не исключена возможность эффективного использования геотермических методов в неглубоких скважинах и шурфах. При активизации гидрогеологических «окон» возможности обнаружения тепловых аномалий заметно увеличиваются. Для изучения движения промышленных стоков иногда целесообразно применять индикационные методы, включая использование радиоактивных изотопов.

Контроль за мерзлотным состоянием пород в районе водозабора. В криолитозоне главное внимание исследователей должно быть направлено на определение температуры пород, контуров таликовых зон, мощности и геокриологического состояния многолетнемерзлых пород. Как известно, в зоне действующих водозаборов эти характеристики подвержены заметным изменениям. Так, например, размеры таликовых зон, как показано О. Н. Толстихиным (1979 г.), при длительной эксплуатации заметно увеличиваются, что способствует лучшей работе водозабора. Для выявления этих изменений могут с успехом использоваться геоэлектрические, геотермические и сейсмические методы исследования (см. раздел 5).

Проведение описанных выше исследований даст возможность уточнить контуры зоны санитарной охраны водозаборов и наметить меры, способствующие охране водоносных горизонтов от загрязнения, истощения и т. п.

8.2. ИССЛЕДОВАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИСКУССТВЕННЫМ ВОСПОЛНЕНИЕМ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При этих работах по степени детальности различают две стадии исследований: а) региональные наблюдения и б) локальные работы, предназначенные для специального гидрогеологического обоснования [27].

Полевые геофизические исследования среднего масштаба могут с успехом использоваться для региональных гидрогеологических работ в целях искусственного восполнения запасов подземных вод, выделяя благоприятные для этого гидрогеологические структуры с мощными коллекторами пресных или солоноватых подземных вод. Таковыми могут быть (после проведения определенных инженерных работ) толщи грубообломочных, трещиноватых либо трещинно-карстовых пород.

Привлечение геофизических данных для специального гидрогеологического обоснования искусственного восполнения запасов и ресурсов подземных вод может осуществляться как в процессе поисково-разведочных работ, так и при эксплуатации месторождений. Главная задача геофизических исследований заключается в изучении мощности, литологического состава и филь-

традиционных свойств пород участка, предназначенного для восполнения подземных вод. Особое внимание уделяется водовмещающим породам и перекрывающим их слабопроницаемым образованиям. В ряде случаев важно изучение путей фильтрации подземных вод из участка восполнения к водозабору (В. Н. Чубаров и др., 1975 г.).

Из геофизических методов при детальном гидрогеологическом исследовании, связанных с восполнением подземных вод, наибольшее применение имеют гидрогеологический каротаж скважин и околоскважинные наблюдения. При изучении разреза терригенных пород, помимо стандартного каротажа, используются резистивиметрия, расходомерический каротаж, гаммакаротаж и термокаротаж [27]. При изучении трещиноватых (или закарстованных) пород в дополнение к перечисленным методам применяются ультразвуковой каротаж и кавернометрия, позволяющая локализовать в разрезе наиболее водообильные участки. Особенно важное значение приобретает каротаж обсаженных скважин на эксплуатируемых месторождениях; привлечение радиоактивных методов каротажа, термокаротажа и УЗК позволяет при такой ситуации осуществить геолого-гидрогеологическую документацию разреза.

Могут использоваться также наземные геофизические исследования, включающие в основном методы электроразведки. При изучении песчано-глинистого разреза это ВЭЗ, ЕП, ЭП, при его слабой дифференцированности — ВЭЗ-ВП. При наблюдениях в водной среде (на дне естественных или искусственных водоемов) желательны также резистивиметрия в комплексе с термометрией. При изучении трещинно-карстовых коллекторов, помимо названных методов, необходимо использовать КВЭЗ, иногда сейсморазведку КМПВ. Полевые исследования ведутся в деталях масштабах — 1 : 10 000 — 1 : 5000 и крупнее.

На действующих водозаборах целесообразно организовать режимные полевые, скважинные и околоскважинные геофизические исследования, направленные на изучение динамики ряда процессов, в частности для выявления изменения интенсивности и путей фильтрации подземных вод вследствие кольматации пород и др.

9. ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

Вопрос о геолого-экономической эффективности каротажных работ, в том числе и тех, которые производятся при гидрогеологических исследованиях, изучен достаточно хорошо. Эффект от каротажа проявляется в: а) более надежной (чем без применения каротажа) гидрогеологической характеристике водоносных горизонтов; б) уменьшении затрат на опытные работы в связи с отказом от многозональных откачек; в) уточнении глубины бурения (как правило, уменьшении ее); г) переходе на бескерновое бурение мощных толщ, перекрывающих водоносные комплексы; д) сокращении времени на ликвидацию аварий, благодаря решению по каротажу ряда специальных задач, облегчающих выполнение этих работ. Таким образом, каротаж способствует улучшению качества бурения при одновременной экономии значительных средств.

Более сложна и менее разработана методика оценки геолого-экономической эффективности геофизических работ, поскольку результаты этих работ проявляются обычно в неявной форме и значительно позже их производства. Как установлено исследованиями последних лет (Д. М. Карпушин, 1977 г., Л. А. Стенин, 1971 г., и др.), геологический и экономический эффекты геофизических работ заключаются в: а) резком увеличении полноты гидрогеологических исследований и их глубинности (вместо дискретной оценки условий по площади и по разрезу удастся получить практически непрерывную характеристику среды); б) сокращении объема дорогостоящего глубокого бурения и опытных работ за счет более обоснованного направления геолого-поисковых работ и частично замены горно-буровых работ геофизическими; в) повышении скорости всего комплекса исследований.

Ниже основное внимание уделено полевым геофизическим работам.

9.1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТ

При поисках и разведке месторождений подземных вод геолого-экономическая эффективность геофизических методов определяется многими факторами. К числу наиболее важных следует отнести стадийность работ, комплексирование методов, выбор сети, глубины и площади исследований, совершенство методики интерпретации. Не менее важным фактором является стоимость геофизических работ.

Как известно, в качестве единицы измерений при расчете стоимости геофизических работ можно использовать: 1 физическую точку (ф. т.), 1 километр (км), 1 км² наблюдений, один участок поисков или разведки. В стоимость единицы работ целесообразно включить не только полевые затраты, но также и организационно-ликвидированные, транспортные, камеральные и т. п. Сюда же следует включить затраты на топографические работы. Это делает оценку стоимости более полной и более объективной, отражающей весь процесс производства.

В табл. 19 приведены средние фактические стоимости единицы геофизических работ, применяемых при поисках и разведке подземных вод в условиях европейской части СССР, Закавказья, Средней Азии, Казахстана и юга Западной Сибири. Таблица составлена на основании статистической обработки материалов более 200 геофизических партий. Эти данные могут служить лишь для примерных сравнительных расчетов и самых общих выводов. Как видно из табл. 19, стоимость работ зависит от используемого метода, глубины разведки, густоты сети наблюдений (шага).

Существенный резерв сокращения стоимости геофизических работ кроется, видимо, в удешевлении сейсморазведки и ВЭЗ-ВП. Этого можно достигнуть в первую очередь за счет снижения массы аппаратуры и замены мощных источников энергии

Таблица 19

Геофизический метод (или модификация)	Показатель глубины исследований	Шаг наблюдений, м	Средняя стоимость, руб.	
			1 ф. т.	1 км
ВЭЗ	$AB_{\max} = 0,5 - 1,0$ км	250—500	12—25	50
„	$AB_{\max} = 4,0$ км	2000	110	55
„	$AB_{\max} = 8,0$ км	4000	275	70
Электропрофилирование СЭП	AB до 0,5—1 км	25—50	1,6	50
двухгоризонтное				
Метод ЕП	—	20—50	1,4	30—70
ВЭЗ-ВП	AB_{\max} до 0,5 км	200	80	400
То же	$AB_{\max} - 1$ км	500	200	400
КМПВ (МПВ)	Глубинность — первые сотни метров	10—20	—	600
ТЗ МПВ для изучения УГВ	УГВ до 10 м	1000—2000	25	—
То же	УГВ до 100 м	1000—2000	175	—
Гравиметровая съемка	—	500	9	18
Магниторазведка — наземные наблюдения с приборами М-23 и др.	—	10—20	0,4	30

на слабые при одновременном повышении чувствительности приборов к регистрируемым сигналам. Не использованы также возможности удешевления традиционных широко используемых методов электроразведки. Применение сплошного электрического зондирования и некоторых новых схем профилирования может в ряде случаев резко повысить производительность труда и соответственно снизить стоимость работ.

Приуроченность к определенной территориальной зоне существенным образом влияет на стоимость геофизических работ. С этой точки зрения можно выделить в СССР три региона: 1) европейская часть страны, Кавказ, Средняя Азия, Казахстан и южная окраина Западной Сибири, 2) южная часть Восточной Сибири и Дальнего Востока и 3) Северо-Восток СССР, Камчатка и о. Сахалин. В южной части Восточной Сибири и Дальнего Востока стоимость геофизических работ примерно в 1,5 раза выше, чем в европейской части страны, а на Северо-Востоке, Камчатке и Сахалине — 2,5—3 раза. Причина заключается в сложных природных условиях, высокой стоимости транспорта, повышенной оплате труда и т. д.

В табл. 20 приводится средняя стоимость изучения комплексом геофизических методов 1 км² площади в зависимости от группы и типа месторождений и масштаба съемки. Стоимость геофизических работ закономерно увеличивается при переходе от исследований в рыхлых породах к скальным и далее к многолетнемерзлым. Стоимость работ увеличивается и при переходе от среднемасштабных к крупномасштабным и детальным работам. Внутри выделенных групп месторождений отмечается наибольшая стоимость исследований объектов, связанных с артезианскими водами; причина заключается в увеличении глубины разведки. Другие закономерности выявить трудно в связи с малым объемом статистического материала.

Стоимость всего комплекса наземных геофизических исследований при изучении одного участка при детальном поиске и детальной разведке месторождений подземных вод проанализирована нами на основе работ ГУЦР МГ РСФСР в условиях Московского артезианского бассейна. Здесь изучены различные типы месторождений (см. выше). В среднем поисковые геофизические работы на участке площадью в 300 км² обходятся в 20—30 тыс. руб., разведочные при площади исследований в 10—30 км² — 8—10 тыс. руб. Таким образом, основная доля затрат ложится на детальные поиски. Проведение среднемасштабных исследований до детальных поисков формально увеличивает общие затраты на разведку одного участка на 5—10%. Однако если учесть реальную возможность сокращения площади детальных поисковых участков за счет среднемасштабных съемок, проведение последних, безусловно, ведет к удешевлению работ (не говоря о том, что при этом увеличивается вероятность выбора лучшего участка под разведку).

Таблица 20

Типы (или подгруппы) месторождений	Районы исследований	Средняя стоимость исследования 1 км ² площади в зависимости от масштаба съемки, руб.				
		1 : 200 000	1 : 100 000	1 : 50 000	1 : 25 000	1 : 10 000
I. Месторождения в рыхлых породах						
Речные долины	Европейская часть СССР, Кавказ, Урал, Средняя Азия, Западная Сибирь	10	50	137	270	—
Конуса выноса	Кавказ, Средняя Азия, Казахстан	11	60	130	—	—
Линзы пресных вод	Средняя Азия, Казахстан	52	50	150	—	—
Напорные воды артезианских бассейнов	Средняя Азия, Казахстан	56	—	—	—	—
В среднем по месторождениям в рыхлых породах	—	28	55	240	270	—
II. Месторождения в трещинных скальных породах						
Трещинно-жильные воды	Украина, Урал, Казахстан	—	—	—	400	1250
Трещинно-карстовые воды	Центральные районы РСФСР, Белоруссия, Урал, Казахстан	—	—	120	420	750
Подземные воды лавовых покровов	Закавказье	—	—	140	—	—
Напорные воды артезианских бассейнов	Центральные районы РСФСР, Крым	—	87	210	—	—
Месторождения морских побережий	Сахалин, Камчатка	—	—	—	—	1200
В среднем по месторождениям в скальных породах	—	—	87	160	410	1070
III. Месторождения в криолитозоне						
Месторождения различных типов	Северо-Восток и Дальний Восток	50	120	—	500	2300

9.2. ПРИЕМЫ ПОДСЧЕТА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В соответствии с существующими положениями определение экономической эффективности геофизических методов при поисках и разведке месторождений подземных вод следует производить, прежде всего исходя из удешевления стоимости 1 м³/сут выявленных ресурсов воды за счет использования этих методов. В настоящее время существует несколько способов таких расчетов (Д. Н. Карпушин, 1977 г.; Л. А. Стенин, 1971 г.; В. Ф. Дунаев, 1973 г.). Различие их зависит главным образом от полноты исходной информации.

Метод «негативной» оценки. В этом методе сравниваются затраты, производимые с применением всего комплекса исследований, включая геофизические работы, с возможными затратами, которые следовало бы произвести, пользуясь лишь традиционными приемами (т. е. без использования геофизических методов). Такая оценка, естественно, далека от объективности, поскольку расчет ведется без учета реальных творческих возможностей специалистов-гидрогеологов; не учитываются во всей полноте конечные результаты геофизических и гидрогеологических исследований; зачастую все подсчеты сводятся к сравнению числа удачно заложенных скважин к общему числу пробуренных скважин. Несмотря на несовершенство, способ «негативных» оценок используется наиболее широко, поскольку не требует большой информации, сложных расчетов и доступен любому специалисту. Приведем примеры.

Часто расчеты сводятся к оценке сэкономленного за счет геофизических методов объема наиболее дорогих видов геологоразведочных работ — бурения скважин. Так, И. М. Кабакова (1972 г.) указывает, что при разведке одного месторождения пресных вод вблизи г. Ленинграда, приуроченного к древним погребенным долинам, заполненным флювиогляциальными отложениями, из пробуренных 11 скважин лишь 2 обнаружили древнее переуглубление. Позже по данным геофизических методов это переуглубление было точно околонтурено, и все последующие скважины оказались правильно намеченными.

При поисках линз пресных вод в засушливых районах основная задача полевых геофизических методов заключается в обнаружении пресных вод и околонтуривании этих линз. По данным М. П. Запария (1956 г.), В. М. Сафина [20] и др., в условиях Тургая, Заволжья и других районов геофизические методы позволяют с высокой степенью достоверности околонтурить линзы пресных вод: в среднем 85 % скважин, заложенных по геофизическим данным, обнаруживают пресные воды. Без геофизических данных число удачных скважин обычно не превышает 40 %. По примерным подсчетам использование геофизики приводит к экономии 15—20 % средств.

Значительный экономический эффект определен при поисках месторождений, приуроченных к предгорным шлейфам и артезианским бассейнам. По подсчетам А. А. Шахназаряна и др. (1967 г.), при общих поисках подземных вод конусов выноса Куринского бассейна метод ВЭЗ позволяет сократить примерно на 90% число поисковых скважин глубиной до 500—600 м. Стоимость таких скважин более чем в 100 раз выше стоимости пункта ВЭЗ. Учитывая значительную площадь исследований, измеряемую тысячами квадратных километров, экономический эффект от применения геофизики оценивается в несколько миллионов рублей. Аналогичный эффект от применения геофизики установлен Ю. А. Осяниным (1970 г.), проводившим электро-разведку методом ВЭЗ в Западном Казахстане и выявившим площади с пресными напорными водами на территории артезианских бассейнов.

Особенно значителен экономический эффект от проведения геофизических работ, когда заключения (обычно на стадии общих поисков) даются по имеющимся фондовым материалам на основе лишь их повторной специализированной интерпретации. В этом случае затраты идут только на камеральную обработку материалов. Например, в 1970 г. Ф. М. Владимиров и Г. А. Ольшевский в районе Жигулей по материалам нефте-разведки построили структурную карту по поверхности карбонатных пород масштаба 1:100 000 на площади 1250 км². Удалось выявить древние погребенные долины, перспективные на подземные воды. Стоимость камеральных работ составляет 3,2 тыс. руб., в то время как специальная постановка геофизических наблюдений обошлась бы примерно в 60—70 тыс. руб.

В качестве аналогичного примера укажем на рассмотренные уже исследования треста Киевгеология на площади УКЩ [30]. Эти работы, заключающиеся в специализированной интерпретации имеющихся геофизических материалов, позволили осуществить общие поиски трещинно-жильных вод в масштабе 1:200 000 на площади, измеряемой десятками тысяч квадратных километров. Стоимость обработки геофизических данных составляет 0,5 руб. за 1 км² вместо 8—12 руб., затрачиваемых при полевых работах.

Примерно такой же экономический эффект получен в результате повторной интерпретации геофизических материалов по Московскому артезианскому бассейну [17], когда на площади около 20 тыс. км² дан прогноз на трещинно-пластовые артезианские воды, а также воды, заключенные в рыхлых отложениях древних погребенных долин. Аналогичные работы, проведенные на территории Сырдарьинского артезианского бассейна [15] в масштабе 1:500 000—1:1 000 000 на площади более 200 тыс. км², обеспечили общие поиски как артезианских вод, так и вод, заключенных в барханных песках. Затраты совершенно незначительные — около 30 тыс. руб.

Метод экспертной оценки. С помощью этого метода устанавливается снижение стоимости единицы разведанных запасов подземных вод (1 м³/сут) за счет применения геофизических методов; количество разведанных запасов определяется на основе решения ГКЗ. Существенное достоинство данного метода (в сравнении с негативным методом) заключается в том, что, во-первых, вместо расчетов и заключений отдельных специалистов принимаются за основу выводы высококвалифицированной группы экспертов и, во-вторых, в качестве главного показателя работ учитываются выявленные запасы, в которых воплощены в наиболее полной форме результаты всего комплекса проведенных исследований. Метод экспертной оценки применялся в условиях Балтийского и Украинского кристаллических щитов.

Как показано Э. П. Позиним и др. (1970 г.) по ряду объектов Балтийского щита, применение комплекса геофизических методов, включающих электро-, магнито- и сейсморазведку, способствует существенному снижению стоимости поисковых работ. Без использования геофизики средняя стоимость разведанных запасов в 1 м³/сут составляет около 100 руб., а с применением указанного комплекса — 30 руб. Удельный вес затрат на геофизику в общем комплексе геологоразведочных работ достигает 30—35%.

По данным М. Н. Байсаровича (1973 г.) и С. А. Шмаряна (1972 г.) также установлено существенное удешевление стоимости поисково-разведочных работ на УКЩ. До 1972 г. здесь использовались в основном электро-, магнито- и гравиразведка. Эффективность работ увеличилась после внедрения в дополнение к ранее применяемым методам (1972 г.) сейсморазведки как при поисках, так и при разведке. Например, при поисково-разведочных работах для обеспечения пресной водой г. Гайворона полные расходы, включая геофизические методы, составили 24 руб. за 1 м³/сут. На аналогичных же объектах, где сейсморазведка не применялась, расходы равнялись в среднем 43 руб., т. е. экономия составила 44%.

Корреляционный метод. Этот метод позволяет выявить стоимость окончательных результатов работ в сопоставлении с отдельными их элементами. Метод способствует более глубокому анализу, особенно если его объединить с методом экспертных оценок. Недостатком корреляционного метода является необходимость чрезвычайно большой исходной информации, что требует обработки данных по значительному числу объектов. Практически это возможно лишь при анализе работ крупных геофизических организаций. Такие условия, в частности, сложились в центральных районах РСФСР на территории деятельности ГУЦР МГ РСФСР, что дало возможность Э. С. Лесанову (1971 г.) оценить эффективность геофизических методов при поисково-разведочных работах на воду на трещинно-карстовых и трещинно-пластовых месторождениях. С 1964 по 1970 г.

геологическими организациями ГУЦР выполнен большой объем поисково-разведочных работ, которые сопровождались геофизическими работами (главным образом электроразведкой) и каротажем скважин. Средняя стоимость поисково-разведочных работ на одном месторождении равна 18 тыс. руб. при выявленных запасах 60 тыс. м³/сут и стоимости 1 м³/сут — 3 руб. 59 коп. Стоимость геофизических работ составляет 5—7 % от общей стоимости работ. По отдельным объектам фактическое сокращение общих расходов на разведку за счет применения геофизики достигает 25 %. Статистическая обработка большого объема фактических данных отмечает общую тенденцию снижения стоимости разведки с увеличением затрат на геофизику. Оптимальные затраты составляют 10—20 коп. на 1 м³/сут разведанных запасов. При дальнейшем росте затрат на геофизику намечается снижение ее экономической эффективности. Нельзя полностью согласиться с этим выводом, поскольку не в полной мере учтены изменения природных условий различных объектов и не выявлены возможности более эффективных геофизических методов, в частности сейсмических, получивших распространение в 70-х годах. Для последних затраты могут достигать не единиц, а первых десятков процентов, т. е. с увеличением эффективности геофизических работ вполне оправдан рост удельного веса их затрат в общем комплексе работ.

Заключение

Анализ большого объема геофизических работ, проведенных в СССР при изучении месторождений пресных подземных вод, убеждает в их высокой геолого-экономической эффективности. Для дальнейшего повышения эффективности работ необходимо особое внимание уделить полевым геофизическим методам, которые применяются в настоящее время в основном лишь при детальных поисках. В значительно большем объеме их можно выполнять на стадии общих поисков, а также при предварительной и даже детальной и эксплуатационной разведке.

Одновременно необходимо расширить круг решаемых задач и комплекс применяемых методов при изучении разнообразных типов месторождений. Желательно внедрение геофизических методов при исследованиях, связанных с искусственным восполнением запасов подземных вод, санитарным контролем в зоне водозаборов, охраной природной среды от загрязнения и истощения ее ресурсов. Заманчивые перспективы открываются в развитии нового направления — полуколичественной оценки фильтрационных свойств водовмещающих и слабопроницаемых пород по данным полевых геофизических методов.

Эффективность геофизических работ повысится при большем использовании современного математического аппарата как при интерпретации, так и при расчете сети наблюдения, выборе оптимального комплекса методов и др.

В области скважинных исследований представляется целесообразным развитие геофизических методов при решении вопросов, связанных с изучением фильтрационных свойств пород и гидродинамики подземного потока. Использование одной лишь расходомерии не может дать полное решение этой проблемы.

В настоящей работе изложены предложения, касающиеся методики полевых и камеральных исследований. Они носят в значительной мере общий характер. Как известно, нет двух одинаковых месторождений: природа их чрезвычайно разнообразна. Поэтому типизация месторождений и предлагаемая в настоящей работе методика исследований представляет собой лишь примерную схему. По мере накопления опыта на основе глубокого изучения природных условий исследуемых объектов необходимо уточнять методику полевых работ и гидрогеологической интерпретации.

Чрезвычайно важным является широкое внедрение сейсморазведки, обладающей большими разведочными возможностями при решении гидрогеологических задач. Ее сочетание с электроразведкой и другими геофизическими методами должно резко повысить эффективность решения геолого-разведочных задач. Наряду с совершенствованием методики исследований необходимо обратить внимание на оценку экономической эффективности геофизических работ, что, безусловно, будет активизировать процесс их внедрения в гидрогеологическую практику.

Список литературы

1. Аид М. А., Огильви А. А. Опыт применения электрометрии для определения границ проникновения морских вод в водоносные горизонты прибрежных районов. Экспресс-информация. Сер. Гидрогеол. и инж. геол., № 5. М., ВИЭМС, 1968.
2. Акимов А. Т., Достовалов Б. Н., Якупов В. С. Геофизические методы исследования мерзлых толщ.— В кн.: II международная конференция по мерзлотоведению. Вып. 8. Якутск, Якут. кн. изд-во, 1975, с. 135—151.
3. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., Недра, 1970.
4. Богословский В. А., Огильви А. А. Электрометрические и термометрические исследования при изучении фильтрации из водохранилища в условиях распространения трещиноватых скальных пород. Экспресс-информация. Сер. Гидрогеол. и инж. геол., № 16. М., ВИЭМС, 1970, с. 10—16.
5. Боровский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Определение гидрогеологических параметров по данным откачек. М., Недра, 1973.
6. Боровский Б. В., Хордикайнен М. А., Язвин Л. С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М., Недра, 1976.
7. Гавич И. К. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования. М., ВИЭМС, 1972.
8. Горяинов Н. Н., Ляховицкий Ф. М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М., Недра, 1979.
9. Гринбаум И. И. Расходомерия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. М., Недра, 1975.
10. Гудзь В. И., Ряполова В. А. Новый способ машинной интерпретации кривых ВЭЗ.— В кн.: Вопросы инженерной геологии и геофизики при изысканиях железных и автомобильных дорог. М., ЦНИИС, 1976, с. 16—30.
11. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Недра, 1972.
12. Комплексование геофизических методов при решении геологических задач. Под ред. В. Е. Никитского и В. В. Бродового. М., Недра, 1976.
13. Куликов Г. В., Грибанов Б. И. Применение геофизических методов при гидрогеологических исследованиях на закрытых территориях.— Разведка и охрана недр, 1970, № 8, с. 24—28.
14. Матвеев Б. К. Методика изучения движения трещинно-карстовых вод геофизическими способами (по результатам работ на Урале).— В кн.: Методика изучения карста. Вып. 5. Геофизические методы. Пермь. Изд. Пермского гос. ун-та, 1963, с. 53—73.
15. Мелькановицкий И. М. Региональные геофизические исследования гидрогеологических условий артезианских бассейнов. М., Недра, 1975.
16. Мелькановицкий И. М., Варганян Г. С., Водоватова З. А. Методика геофизических исследований при поисках и разведке минеральных вод. М., Недра, 1978.
17. Мелькановицкий И. М., Попова Е. В. Использование геофизических данных для гидрогеологического изучения верхней части осадочного чехла Московского артезианского бассейна.— Водные ресурсы, 1979, № 3, с. 84—99.
18. Методические рекомендации по каротажу гидрогеологических скважин/ И. М. Гершанович, Г. Я. Черняк, И. Т. Гаврилов и др. М., Наука, 1972.
19. Методические рекомендации по количественной интерпретации данных каротажа/С. Г. Комаров, Н. А. Перьков, З. И. Кейвсар. М., ВНИИГеофизика, 1972.
20. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. М., Недра, 1972.

21. *Минасян Р. С.* Изучение вулканических сооружений методом электроразведки в связи с вопросами водоснабжения.— В кн.: Применение геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., ВИЭМС, 1970, с. 37—46.
22. *Огильви А. А.* Геофизические исследования. М., изд-во МГУ, 1962.
23. *Огильви А. А., Кузьмина Э. Н., Петрухин Б. П.* Удельное электрическое сопротивление поверхностных вод как поисковый признак разгрузки подмерзлотных вод. Экспресс-информация. Сер. Регион., развед. и промысл. геофизика. М., ВИЭМС, 1978, № 8, с. 16—23.
24. *Огильви Н. А.* Физические и геологические поля в гидрогеологии. М., Наука, 1974.
25. *Огильви Н. А., Лантев В. Ф., Мясковский О. М.* Геофизические методы поисков и разведки линз пресных вод.— В кн.: Линзы пресных вод пустыни. М., АН СССР, 1963, с. 323—357.
26. *Плотников Н. И.* Поиски и разведка подземных вод для целей крупного водоснабжения. М., изд-во МГУ, ч. 1, 1966, ч. 2, 1968.
27. *Плотников Н. И., Плотников Н. А., Сычев К. И.* Гидрогеологические основы искусственного восполнения подземных вод. М., Недра, 1978.
28. *Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения.* Гл. ред. Н. Н. Биндеман. М., Недра, 1969.
29. *Пригода В. Я., Ряполова В. В.* Методические рекомендации по каротажу скважин на воду в районах БАМ. М., ЦНИИС, 1978.
30. *Применение геофизических методов при решении прогнозно-гидрогеологических задач на территории Украинского щита/М. Н. Байсарович, Е. Л. Беспалова, С. А. Шмарьян, И. М. Мелькановицкий.—* Водные ресурсы, 1977, № 1, с. 71—85.
31. *Применение методов геофизики при изучении областей формирования стоков в карбонатных отложениях артезианских бассейнов/В. А. Богословский, В. Н. Кожевников, Э. Н. Кузьмина, А. А. Огильви.—* В кн.: Геофизические и математические методы при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд-во МГУ, 1970, с. 63—81.
32. *Применение наземных геофизических методов для изучения трещиноватости и водообильности коренных пород/В. С. Матвеев, Н. Н. Шарпанов, Т. А. Судакова, С. П. Ипполитова. М., ВСЕГИНГЕО, 1978.*
33. *Проведение исследований и разработка методики интерпретации кривых ВЭЗ при поисках подземных вод на трассе БАМ/В. Я. Пригода, В. С. Бабин, В. А. Ряполова и др. М., ЦНИИС, 1976.*
34. *Пугач В. Б.* Особенности исследования толщ многолетнемерзлых пород методами электроразведки. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. геол.-мин. наук. М., ВСЕГИНГЕО, 1974.
35. *Ряполова В. А.* Методические указания по геофизическим методам исследования скважин на изысканиях железных дорог. М., ЦНИИС, 1962.
36. *Ряполова В. А.* Методика интерпретации кривых ВЭЗ. М., Желдориздат, 1972.
37. *Рыжов А. А.* Способ расчета многослойных кривых ВЭЗ ВП.— Труды ВСЕГИНГЕО, вып. 74. М., 1974, с. 94—101.
38. *Семенов А. С.* Электроразведка методом естественного электрического поля. 2-ое изд., перераб. и доп. Л., Недра, 1974.
39. *Судоплатов А. Д.* Методика определения величин ρ_0 , P_a , C_0 и K_w по данным КВЭЗ.— В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Средней Азии. Ташкент, Наука, 1965, с. 110—119.
40. *Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А.* Принципы комплексирования в разведочной геофизике. М., Недра, 1977.
41. *Толстихин О. Н., Якупов В. С.* Структурно-гидрогеологические предпосылки методов поиска подземных вод в Восточной Сибири.— В кн.: Региональные и тематические геокриологические исследования. Новосибирск, Наука, 1975, с. 69—79.
42. *Шарпанов Н. Н., Черняк Г. Я., Барон В. А.* Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель. М., Недра, 1978.

43. *Шарапанов Н. Н., Черняк Г. Я., Судоплатов А. Д.* Изучение анизотропии пород методом ВЭЗ ВП.— Разведка и охрана недр, 1978, № 3, с. 40—42.
44. *Шестаков В. М.* Динамика подземных вод. М., изд-во МГУ, 1973.
45. *Язвин Л. С., Боровский Б. В.* Типизация месторождений подземных вод и их группировка для оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод.— Труды ВСЕГИНГЕО, вып. 93, 1976, с. 4—14.
46. *Язвин Л. С., Боровский Б. В., Гродзенский В. Д.* Методическое руководство по поискам и разведке пресных подземных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1979.
47. *Benvenuti Giovanni, Norinelli Armando.* Studio geofisico di interfaccia acqua dolce — acqua marina nell'area circumlagunare veneta e nella zona delle sorgenti del chidro (Taranto). Met. ist. geol. eminer. Umv. Padova, 1974—1976, vol. 31, pp. 1—15.

Оглавление

Предисловие	3
1. Гидрогеологические основы поисков и разведки подземных вод . . .	4
1.1. Типизация месторождений подземных вод	5
1.2. Стадии, задачи и методика гидрогеологических исследований	15
1.3. Методы оценки запасов подземных вод	23
1.4. Комплексирование гидрогеологических, геофизических и других методов	29
2. Методы геофизических исследований	34
2.1. Основы методики полевых работ	34
2.2. Принципы гидрогеологической интерпретации геофизических данных	46
2.3. Типизация месторождений пресных подземных вод по геофизическим признакам	47
3. Исследования месторождений подземных вод в рыхлых терригенных породах	49
3.1. Общие вопросы методики	49
3.2. Подземные воды речных долин	65
3.3. Подземные воды конусов выноса	77
3.4. Линзы пресных вод	82
3.5. Подземные воды ледниковых отложений	90
3.6. Пластово-поровые напорные воды артезианских бассейнов	93
4. Исследования месторождений трещинно-карстовых и трещинно-пластовых подземных вод	102
4.1. Общие вопросы методики	102
4.2. Трещинно-жильные подземные воды в изверженных и метаморфических породах	113
4.3. Трещинные воды базальтовых покровов	123
4.4. Трещинно-карстовые воды карбонатных пород	130
4.5. Трещинно-пластовые напорные воды артезианских бассейнов	138
5. Исследования месторождений подземных вод в криолитозоне	145
5.1. Общие вопросы методики	145
5.2. Подземные воды таликовых зон речных долин, подозерных и подаласных таликов	156
5.3. Подмерзлотные воды артезианских бассейнов	167
5.4. Подземные воды в породах зон тектонических нарушений и экзогенной трещиноватости	171
6. Особенности исследований месторождений морских побережий . . .	176
6.1. Общие вопросы методики	176
6.2. Подземные воды в условиях рыхлых терригенных пород	178
6.3. Подземные воды в условиях трещиноватых скальных пород	182
6.4. Подземные воды в условиях криолитозоны	184
7. Гидрогеологический каротаж	187
7.1. Задачи исследований и методы каротажа	187
7.2. Каротаж скважин, пройденных в рыхлых породах	187
7.3. Каротаж скважин, пройденных в скальных породах	203
7.4. Каротаж скважин, пройденных в мерзлых породах	215

8. Перспективы геофизических исследований в целях охраны природной среды в связи с эксплуатацией подземных вод	219
8.1. Учет влияния на окружающую среду водозаборов, промышленных горнорудных и других предприятий	221
8.2. Исследования, связанные с искусственным восполнением запасов подземных вод	223
9. Геолого-экономическая эффективность геофизических работ	225
9.1. Основные факторы, определяющие эффективность работ	225
9.2. Приемы подсчета экономической эффективности	229
Заключение	233
Список литературы	235

Илья Маркович Мелькановицкий,
Вера Александровна Ряполова,
Матвей Александрович Хордикайнен

МЕТОДИКА
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПРЕСНЫХ ВОД

Редактор издательства *А. И. Вороновская*
Переплет художника *В. В. Голикова*
Художественный редактор *В. В. Шутько*
Технические редакторы *Л. Я. Голова,*
Н. С. Гришанова
Корректор *А. А. Передерникова*

ИБ № 3349

Сдано в набор 17.09.81. Подписано в печать 21.12.81. Т-30338.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 15,0. Усл. кр.-отт. 15,0. Уч.-изд. л. 16,48. Тираж 2600 экз. Заказ 286/7657-3.
Цена 1 р. 20.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633,
Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при
Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.

18836

ЧЕДРА