

И. М. ГЕРШАНОВИЧ

**РАЗВЕДКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
В ТРЕЩИНОВАТЫХ
ПОРОДАХ
ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ
МЕТОДАМИ**

И. М. ГЕРШАНОВИЧ

РАЗВЕДКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОДЗЕМНЫХ ВОД
В ТРЕЩИНОВАТЫХ
ПОРОДАХ
ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ
МЕТОДАМИ



МОСКВА «НЕДРА» 1975

Гершанович И. М. Разведка месторождений подземных вод в трещиноватых породах геофизическими методами. М., «Недра», 1975. 128 с.

В книге рассмотрены основные возможности применения данных геофизических исследований с поверхности и в скважинах при разведке подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. Материал систематизирован по задачам, которые последовательно выдвигаются с целью обоснования гидродинамической схемы месторождения и оценки эксплуатационных запасов подземных вод. В их числе: картирование обводненных зон, изучение структуры и фильтрационных свойств водовмещающей среды, анализ условий питания и взаимосвязи водоносных горизонтов.

Из геофизических методов исследования с поверхности рассмотрены электроразведка, сейсморазведка, гравиразведка и магниторазведка. Комплекс скважинных исследований включает методы электрического, радиоактивного, акустического каротажа, резистивиметрии и расходоиметрии. Возможности решения рассмотренных задач различными методами и комплексами показаны на примерах.

Книга рассчитана на гидрогеологов и геофизиков, работающих в области гидрогеологических изысканий.

Табл. 1, ил. 31, список лит. — 77 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Изучение гидрогеологических характеристик горных пород является одной из ответственных задач многих инженерных изысканий. Решению указанной задачи посвящено большое число исследований и разработок, несмотря на это она не перестает быть актуальной. В связи с совершенствованием методов гидрогеологических прогнозов (в различных инженерных расчетах и проектах) и повышением требований к их достоверности все острее ставится вопрос об усовершенствовании методов и методик получения исходных данных как с позиций оперативности проведения исследований, так и повышения их информативности. Наиболее остро этот вопрос стоит при исследовании районов распространения трещиноватых и закарстованных пород. Как объекты гидрогеологического изучения они характеризуются разнообразием пространственных форм и граничных условий, обуславливающих виды гидрогеологических работ и методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Создание представления о гидродинамической схеме района распространения подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах оказывается сложным, а результат, как показывает практика, во многих случаях достаточно приближенным. Именно по этой причине при разведке источников водоснабжения за счет подземных вод, связанных с трещиноватостью и закарстованностью пород, зафиксирован наибольший процент случаев оценки эксплуатационных запасов гидравлическим методом. В последнее время закономерно встал вопрос о целесообразном уровне разведанности таких месторождений, достаточном для прогноза гидрогеологических условий и принятия инженерных решений. Это вызвано тем, что для повышения достоверности гидрогеологических прогнозов в указанных условиях прирост информации, основанный на увеличении объемов традиционных гидрогеологических методов исследования, становится на определенном этапе экономически не оправданным. Выход из положения справедливо усматривается в привлечении иных методов исследования, в частности геофизических. Имеется достаточно оснований для использования их в качестве эффективного средства получения необходимой информации. Можно назвать ряд задач, решение которых возможно только методами геофизических исследований.

В последние годы геофизические методы используются в практике гидрогеологических работ во все возрастающих объемах. Этому способствовали работы [43, 44, 50, 51, 76], давшие общее представление о возможностях геофизических исследований в гидрогеологических изысканиях. Однако для решения основного вопроса гидрогеологических исследований — характеристики гидродинамической схемы месторождений — и принятия инженерных решений, геофизические методы используются недостаточно. Это означает, что постановка и использование указанных методов исследований должны быть направлены прежде всего на выяснение условий залегания водоносных пород в плане и в разрезе, на оценку свойств водовмещающих пород и их изменчивости в пространстве, на выявление граничных условий, характеризующих взаимодействие исследуемого горизонта с поверхностным стоком и другими водоносными горизонтами, развитыми в районе, на определение точек наиболее удачного заложения эксплуатационных скважин.

В данной работе впервые предпринята попытка систематизировать возможности и целесообразные направления использования геофизических исследований при разведке месторождений подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. Центральной идеей работы является использование геофизических исследований для обоснования гидродинамической схемы месторождения как основы прогноза гидрогеологических условий в связи с оценкой эксплуатационных запасов подземных вод. Изложенные в работе соображения о возможностях решения коренных гидрогеологических задач демонстрируются на примерах использования геофизики в различных районах страны.

Однако несмотря на большое число производственных геофизических работ, подобные примеры еще эпизодичны. Это пока не позволяет осуществить более содержательное обобщение результатов геофизических исследований в приложении к гидрогеологическим изысканиям при разведке месторождений подземных вод. Автор сознавал это и все же рискнул изложить свою точку зрения на назначение и место геофизических исследований при разведке месторождений подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах, полагая этим привлечь внимание специалистов, что способствовало бы объединению их усилий на дальнейшее решение указанной проблемы.

Необходимо отметить еще одну сторону данной работы, определившую направленность, содержание и даже форму изложения материала. В практике многих организаций геофизические исследования в процессе гидрогеологических изысканий (как и разведочных работ на другие виды сырья) выполняются на подрядной основе. В качестве заказчика геофизических работ выступает гидрогеолог, ответственный за разведку месторождения подземных вод или оценку гидрогеологических условий

других разведываемых объектов. Поэтому очень важно, чтобы в этом звене производственных отношений гидрогеолог хорошо ориентировался в возможностях геофизических методов исследования и мог обоснованно и конкретно сформулировать задачу, ибо это в значительной мере определяет объемы, виды и сроки геофизических работ.

В связи со сказанным работа имеет двойное назначение. В том, что касается рассмотрения возможностей геофизических методов, условий их проведения и применения, она ориентирована в большей степени на специалистов-гидрогеологов, а в том, что касается постановки задач гидрогеологического изучения и направленности геофизических исследований на их решение — на специалистов-геофизиков, работающих в области гидрогеологических изысканий. Соответствующим образом подобраны примеры, позволяющие продемонстрировать возможности геофизических методов при решении наиболее сложных вопросов гидрогеологического изучения трещиноватых и закарстованных пород. Поскольку работа имеет практическую направленность, в ней рассмотрены возможности только основных методов гидрогеологической геофизики, принятых на вооружение производственными организациями и обеспеченных серийной аппаратурой.

Работа состоит из двух частей, соответственно посвященных геофизическим исследованиям с поверхности и геофизическим исследованиям в скважинах. Построение обеих частей книги идентично с учетом специфики, определяемой существом и принципиальными возможностями соответствующих исследований. Это сделано преднамеренно, чтобы подчеркнуть единство исследований с поверхности и в скважинах при решении основных задач гидрогеологической разведки. При этом решаемая задача является звеном, объединяющим различные методические возможности.

При составлении работы автор использовал как собственные материалы, так и материалы других авторов. Особенно широко использованы материалы лаборатории геофизических методов исследования Всесоюзного научно-исследовательского института гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО) (Н. Н. Горяинов, В. С. Матвеев, К. М. Тен, Г. Я. Черняк, В. Н. Чубаров, Н. Н. Шарапанов), явившиеся результатом исследований указанных товарищей или собранные ими в различных производственных организациях. Вместе с тем в работе проанализирован опыт нефтепромысловой геофизики в сходных областях приложения. Ревизия возможностей последней с точки зрения использования в гидрогеологических исследованиях может способствовать скорейшему перенятию передового опыта.

В обсуждении задач и содержания данной работы принимали участие В. Д. Бабушкин, Б. В. Боровский, Н. М. Варламов,

Н. Н. Горяинов, В. С. Матвеев, И. М. Мелькановицкий, К. М. Тен, Г. Я. Черняк, Л. С. Язвин. Большую помощь при ее подготовке оказала И. Д. Каринская. Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность всем перечисленным товарищам и особенно признателен рецензенту З. Г. Яценко, внимательно прочитавшей рукопись, сделавшей ряд полезных замечаний и рекомендаций. Все они учтены при подготовке работы к печати.

Часть первая

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективное применение геофизических методов невозможно без геологической конкретизации объекта исследования, т. е. без литолого-петрографической характеристики отложений, служащих водовмещающей средой, и без знания структурно-тектонических особенностей залегания аномально водоносных объектов. В связи с этим целесообразно все разнообразие областей распространения трещинных и трещинно-карстовых вод свести к следующим типам: 1) в карбонатных отложениях; 2) в консолидированных терригенных и метаморфических породах; 3) в изверженных породах; 4) в зонах тектонических нарушений.

Эта типизация природных условий имеет вспомогательный характер и предназначена для лучшей ориентации в возможностях приложения геофизических методов, вопросы же методики их осуществления во многом остаются общими.

Области распространения трещинно-карстовых вод в карбонатных отложениях

Области развития трещинно-карстовых вод связаны с распространением карбонатных пород: известняков и доломитов (в большей степени), мергелей и мела (в меньшей степени).

Выделяют три основные формации карбонатных пород: платформенную, краевых прогибов и геосинклинальных областей. Платформенная формация карбонатных пород характеризуется пологим залеганием, слабым развитием разрывной тектоники. Карстующиеся породы прикрыты слоем рыхлых образований небольшой мощности (Московская синеклиза). Формация краевых прогибов отличается формированием мощных толщ терригенных пород при наличии неслоистых рифогенных известняков, перемежающихся с пачками гипса и каменной соли (как, например, в Предуральском прогибе). Карбонатные формации геосинклинальных областей отличаются большими мощностями, достигающими нескольких тысяч метров, интенсивной пли-

кативной и дизъюнктивной структурой и трещиноватостью. Карбонатные породы этого типа локализуются, как правило, в линейно вытянутые узкие полосы, согласующиеся по простиранию с общей тектонической структурой горных сооружений. Ширина этих полос не превышает 5 км, но протяженность может достигать сотен километров.

Одним из условий развития карста для всех трех формаций карбонатных пород является постоянная циркуляция воды по порам или трещинам в растворимых породах. Решающее значение для развития карста имеют два рода трещин: региональные, довольно равномерно пронизывающие всю породу, и локальные, секущие породы в различных направлениях. Глубина и интенсивность развития трещиноватости и карста зависит от условий и формы залегания карбонатных пород и от их геологической жизни.

В условиях платформы с пологим залеганием пород мощность зоны активной трещиноватости и карстообразования обуславливается в основном процессами выветривания и потому измеряется, как правило, несколькими десятками метров. На участках, претерпевших относительно мощные тектонические движения с опусканием блоков, находившихся ранее в зоне активного взаимодействия с атмосферой, глубина распространения трещиноватости и карста может достигать 500—600 м. К указанному нужно добавить, что немаловажное значение имеет вещественный состав (прежде всего глинистость) первичных карбонатов и его изменение в связи с циркуляцией подземных вод, которая может привести к коагуляции или заживлению трещин на последующих стадиях геологической жизни карбонатных отложений.

Области распространения трещинных вод в консолидированных терригенных и метаморфических породах

Области развития трещинных вод в терригенных и метаморфических породах могут быть связаны с песчаниками, алевритами, аргиллитами, сланцами, оказавшимися в зоне активного воздействия тектонических движений и процессов выветривания. По генетическим признакам воды этих областей сходны с трещинно-карстовыми водами карбонатных отложений.

Исследованиями в различных геосинклинальных районах, геолого-тектонические условия которых способствовали метаморфизации терригенных осадков под действием давления и температуры, установлено, что фильтрация подземных вод определяется прежде всего трещиноватостью этих пород, захватывающей различные литологические слои. При наличии растворимого цемента на поздней стадии диагенетизации под действием циркулирующих подземных вод в этих породах (песчаниках, конгло-

мератах) могут создаваться условия фильтрации, сходные с условиями фильтрации в карбонатных коллекторах.

Площади развития активно обводненных трещиноватых терригенных пород имеют большее (в сравнении с карбонатными) тяготение к современной эрозионной сети. В вертикальном разрезе указанные породы обычно распространены до глубины 50—100 м с ярко выраженной тенденцией к монотонному затуханию активной трещиноватости [15].

Области распространения трещинных вод в изверженных породах

Трещинные воды изверженных пород распространены в пределах площадей развития интрузивных массивов и покровных эффузивных пород в горноскладчатых и платформенных районах.

В горноскладчатых районах интрузивные породы обычно обладают небольшой водообильностью, эффузивные, как правило, обводнены значительно. Воды этих пород формируются чаще в покровных отложениях и отдельных пластах четвертичных и плиоценовых лав, характеризуются интенсивной циркуляцией по трещинам и активным взаимодействием с поверхностью, часто разгружаются в виде крупных нисходящих родников. В платформенных районах воды приурочены к локальным зонам трещиноватости в пределах древних кристаллических массивов. В ряде случаев эти зоны имеют достаточную водообильность и благоприятные условия восполнения запасов для организации крупного водоснабжения. Глубина распространения зон трещиноватости в изверженных породах, представляющая практический интерес, как правило, не превышает 100—120 м.

Области распространения трещинных вод, приуроченных к зонам тектонических нарушений

Области развития трещинных вод зон тектонических нарушений, как следует из названия, распространены в кристаллических породах в пределах складчатых систем и щитов. Воды этого типа приурочены к зонам интенсивно трещиноватых пород в разломах, в приконтактных частях интрузивных тел или толщ метаморфических пород, отличающихся по вещественному составу и физическим свойствам. Видимая мощность таких зон варьирует в широких пределах от единиц до сотен метров, а протяженность — от десятков до тысяч метров. Глубина распространения зон открытой трещиноватости иногда достигает сотен метров. Как правило, зоны развития вод, связанных с тектоническими нарушениями, имеют крутое падение, нередко близкое к вертикальному. Их контакты с вмещающими слабо разрушенными породами обычно четкие.

Области распространения трещинных вод рассматриваемого типа иногда представляют значительный интерес как источники водоснабжения с большими эксплуатационными запасами (Балтийский кристаллический щит).

Сходными по морфологии с зонами развития трещинных вод бывают обводненные участки в дресвяно-щебенистых образованиях древних кор выветривания.

При изучении объектов подземных вод в перечисленных условиях геофизическими методами исследования с поверхности имеют значение следующие факторы: глубина залегания кровли водовмещающих трещиноватых и закарстованных пород; дифференциация водовмещающих пород по значениям физических свойств, обязанная различию пород по литолого-петрографическому составу; соотношения физических свойств в нарушенных и ненарушенных блоках пород; характер диагенетических процессов (привнос или вынос минералов, динамометаморфизм и т. п.), способствующих созданию аномального распространения физических свойств пород в районе развития трещинных и трещинно-карстовых вод; наличие пространственной ориентировки трещиноватости; характер контактов между нарушенными и ненарушенными блоками пород; вертикальная и горизонтальная мощность водоносного горизонта; состав перекрывающих осадков.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ И ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПОВЕРХНОСТИ

Принципиальное отличие подземных вод как полезного ископаемого, аккумулированного в горных породах, от других видов сырья состоит в том, что они непрерывно восполняются в процессе отбора. Именно восполнение является часто определяющей составной частью эксплуатационных запасов подземных вод, водопритоков в горные выработки и т. д. В связи с этим задача изучения гидрогеологической обстановки имеет два основных аспекта: это изучение собственно объекта (водоносный горизонт, его распространение, условия залегания, свойства) и граничных условий (взаимосвязь с окружающей средой, поверхностным стоком, атмосферой). К изучению различных составляющих элементов этой задачи привлекаются различные методы. При использовании геофизических методов предполагается, что перечисленные элементы порознь или вместе, прямо или косвенно отражаются в распределении физических полей. При этом имеют значение и величины, и форма, и динамика измеряемых полей. Не все составляющие характеристики гидрогеологических условий имеют аномальные отображения в физических полях. Это может быть обусловлено как интенсивностью развития гидрогеологических факторов в горных породах (степень трещиноватости и закарстованности, скорость циркуляции

подземных вод), так и особенностями пространственного расположения изучаемого объекта (глубина залегания, свойства пород на контактах). Отсюда следует, что применение геофизических методов может иметь объективные ограничения.

Как и при разведке месторождений других видов сырья, в качестве поисковых, индикаторных и прочих признаков обводнения горных пород используются различные парагенетические и сопутствующие явления. Именно они часто создают заметные деформации нормального поля. Получаемую в этих случаях геофизическую информацию можно рассматривать как косвенную. Так, выявление водоносных зон в районах развития тектонической деятельности начинается с картирования зон дисъюнктивных нарушений. Именно они благодаря сопутствующей трещиноватости оказываются наиболее благоприятными для аккумуляции и транзита подземных вод. Но в физических полях, например гравимагнитных, отражается прежде всего первопричина явления, обусловившая пространственное перераспределение масс с различными физическими характеристиками.

Одни и те же значения физических, особенно электрических, показателей могут определяться различными по своей природе геологическими факторами. В их число могут входить факторы, представляющие поисковый интерес. Получаемая в этих случаях геофизическая информация оказывается неоднозначной, а ее геолого-гидрогеологическая интерпретация вероятностной. Особенно это проявляется при попытках связать физические и геологические факторы количественными соотношениями. В одних случаях эта вероятность может быть очень высокой, в других — крайне низкой. Например, соответствие электрической анизотропии, зафиксированной по данным круговых измерений, водовмещающим трещиноватым кристаллическим породам на площади Балтийского щита имеет вероятность, близкую к единице. Суждение о факте водоносности выявленных зон трещиноватости кристаллических пород на основании тех же показаний в районе Приазовского щита может быть сделано с вероятностью, значительно меньшей¹. Для повышения вероятности решения тех или иных задач во всех случаях прибегают к комплексированию различных методов.

Такое состояние подземных вод, как движение, может быть единственной причиной формирования аномальных значений физического поля в конкретных геолого-гидрогеологических условиях. Это явление используется в исследованиях методами заряженного тела и естественных потенциалов. Соответственно информация, получаемая в результате таких геофизических ис-

¹ Статистические соотношения водоносных и заглинизированных зон трещиноватости в районе Приазовского щита, как нам известно, не определялись. Их разделение является в этом районе специальной разведочной задачей.

следований, может рассматриваться как прямая или однозначная.

В приведенной схематизации информативности методов гидрогеологической геофизики по возможностям решения гидрогеологических задач не затронут вопрос о чувствительности применяемых способов измерений. В ряде случаев указанная чувствительность может иметь решающее значение для эффективности геофизических работ. Поэтому в каждом отдельном случае техническая реализация измерений должна согласовываться с соответствующей конкретной геологической обстановкой. Вопросы выбора способов и средств осуществления измерений относятся к сугубо методическим и потому в данной работе не рассматриваются. С ними можно познакомиться в специальной литературе [6, 11, 27, 39, 59, 63, 67].

В общем случае при изучении гидрогеологических особенностей трещиноватых и закарстованных пород в связи с обоснованием возможности эксплуатации подземных вод можно выделить три группы вопросов, решение которых осуществимо с помощью геофизических исследований: изучение геометрии водовмещающей среды и пространственных форм ее обводнения; изучение структуры и состояния водовмещающей среды; изучение условий питания и движения подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. Можно заметить, что такое разграничение приложений геофизических методов имеет принципиальное значение для проектирования методики производства работ и интерпретации данных. Так, для решения вопросов первой группы основное значение имеет пространственная дифференциация геофизических показателей. Соответственно методика геофизических работ должна быть нацелена прежде всего на обеспечение такой разрешающей способности исследования, которая обеспечила бы локализацию в пространстве объекта заданных размеров. При этом в понятие разрешающая способность включены чувствительность измерительной аппаратуры, глубинность измерений, густота точек наблюдения на поверхности и избирательная способность измерений (или способа их обработки) к полезному сигналу от изучаемого объекта. Для решения вопросов второй группы дополнительно становится важным получение абсолютных значений геофизических параметров и характеристик. Они могут быть получены непосредственно на этапе измерения или в процессе обработки данных наблюдений. И, наконец, для решения вопросов третьей группы привлекаются также исследования, позволяющие получить геофизические аномалии, обусловленные деформацией уровня физического поля, принятого за нормальный. В связи с этим предусматривается либо производство измерений во временном цикле, либо производство разовых измерений, которые сопоставляются с теоретическим распределением нормальных значений физического поля.

Необходимо отметить, что указанное разграничение методов и методик правомерно в первом приближении. Есть немало примеров, когда одни и те же исследования используются в приложении к решению вопросов различных групп.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В гидрогеологических изысканиях применяются следующие геофизические методы: электроразведка, магниторазведка, гравиразведка, сейсморазведка. Объем, а также исторический опыт использования указанных методов наземных геофизических исследований для гидрогеологических изысканий неодинаковы.

Электроразведка

Наибольшее применение в практике гидрогеологических работ по сравнению с другими геофизическими методами получила электроразведка. В настоящее время существует много модификаций электроразведки, различающихся способом возбуждения и измерения электрического поля. В данной работе рассматриваются лишь те модификации, эффективность которых при изучении гидрогеологических условий трещиноватых и закарстованных пород подтверждена практикой.

Метод вертикальных электрических зондирований

Исследования методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) позволяют получить величину кажущегося удельного сопротивления ρ_k горных пород и закономерность его изменения в вертикальном разрезе [27]. Глубина исследования разреза по методу ВЭЗ является функцией величины разности потенциалов AB , что определяет методику измерений. Максимальные разности потенциалов AB зависят от особенностей геоэлектрического разреза и обычно соответствуют 5—10-кратной глубине исследования.

Исходным материалом для интерпретации данных метода ВЭЗ являются кривые зондирования $\rho_k = f(AB/2)$, анализируя которые, определяют: количество слоев геоэлектрического разреза, их глубину залегания и мощность; значения электрического сопротивления слоев и их геологические или гидрогеологические характеристики.

Наилучшие результаты в определении геоэлектрических границ и величины ρ_k отдельных горизонтов по данным ВЭЗ достигаются при горизонтальном или слабонаклонном (до 10°) залегании и благоприятном соотношении мощностей и сопротивлений слоев [58].

Благоприятным соотношением мощностей последовательно сменяющихся слоев является соотношение, когда мощность оцениваемого горизонта превышает суммарную мощность перекры-

вающих слоев, а благоприятным соотношением сопротивлений чередующихся слоев — то, при котором наблюдается синусоидальный характер изменения их величин. Мощность и сопротивление в силу принципа эквивалентности одновременно отражаются на кривой зондирования, что является причиной неоднозначности метода ВЭЗ. В связи с этим уверенная геолого-гидрогеологическая интерпретация данных ВЭЗ, как, впрочем, и других геофизических методов, невозможна без данных опорного бурения. Выбор точек для опорного бурения осуществляется по карте типов ВЭЗ с таким расчетом, чтобы каждый тип был охарактеризован хотя бы одной скважиной¹.

Метод ВЭЗ в основном предназначен для изучения распространения и условий залегания водовмещающих пород, а также выяснения общих закономерностей данного геоэлектрического разреза с целью постановки в дальнейшем работ методом электропрофилирования.

Для определения пространственной ориентировки зон трещиноватости и оценки степени трещиноватости пород применяются круговые ВЭЗ (метод круговых вертикальных электрзондирований КВЭЗ). Такие измерения производятся по нескольким (обычно четырем) азимутальным направлениям ориентировки измерительной установки, пересекающимся в одной точке на плоскости. Исходным материалом для интерпретации данных метода КВЭЗ являются полярные диаграммы r_k для различных разносов линии AB , служащие основой изучения пространственной электрической анизотропии пород и причин, ее обуславливающих.

Метод электропрофилирования

Исследования методом электропрофилирования (ЭП) позволяют изучать изменение кажущегося электрического сопротивления вдоль профиля при фиксированном размере измерительной установки [5, 6]. Изменения сопротивления вдоль профиля могут быть проинтерпретированы либо как следствие изменения глубины залегания трассируемого геоэлектрического горизонта, либо как встреча объекта с аномальным сопротивлением в пределах исследуемой глубины. В связи с неоднозначностью возможного ответа электропрофилирование обычно выполняют с несколькими разносами линии AB (чаще два). Они выбираются из расчета, чтобы меньший разнос AB захватывал толщу выше предполагаемой кровли исследуемого горизонта для учета возможной ее неоднородности. Больший разнос линии AB по глубинности исследования соответствует предполагаемой глубине до нижней границы распространения трещиноватости и карста. Разносы линий AB выбираются по предварительным

¹ В качестве опорных значений глубин в ряде случаев могут использоваться данные сейсморазведки.

данным ВЭЗ, выполненным по редкой рекогносцировочной сети [50].

Среди модификаций электропрофилирования различают: симметричное, дипольное, комбинированное¹. При изучении водоносности пород, связанной с трещиноватостью и карстом, предпочтение обычно отдается несимметричным двухсторонним установкам профилирования (дипольное и комбинированное), поскольку в этом случае середина искомого объекта фиксируется характерной точкой пересечения лево- и правостороннего графиков сопротивления [5].

При проведении электропрофилирования шаг наблюдения по профилю устанавливается с таким расчетом, чтобы результирующий график ρ_k представлял собой некоторую закономерную функцию. Это, видимо, отвечает требованию, чтобы шаг наблюдения был по крайней мере в 3 раза меньше линейных размеров картируемого объекта. Обычно шаг наблюдения находится в пределах 10—50 м.

Исходным материалом для интерпретации данных метода электропрофилирования в различных модификациях являются графики сопротивления (при исследовании по одиночным профилям), карт-графики и планы изолиний сопротивления (при исследовании по сети профилей).

Исследования методом электропрофилирования предназначены для изучения распространения и условий залегания водовмещающих пород и зон повышенной водоносности.

Для более детального изучения трещинных и трещинно-карстовых водоносных горизонтов могут применяться модификации электропрофилирования, предусматривающие круговые измерения (аналогично КВЭЗ) или измерения по разнонаправленным профилям. В этом случае дополнительно анализируются некоторые статистические характеристики электрического поля [28, 52], обусловленные анизотропией трещиноватой и трещинно-карстовой среды.

Метод естественного электрического поля

Исследования методом естественного электрического поля (ЕП) позволяют изучать распределение естественного потенциала, возникающего в результате фильтрации воды в горных породах [17, 50, 63]. Значения естественных потенциалов, фиксируемые по методу ЕП, могут достигать значительных величин и, как показывает опыт, зависят от скорости фильтрации подземных потоков. Эта особенность положена в основу производства площадных съемок ЕП для картирования и дифференциации водовмещающих пород по их водопроводящим способностям. Характерной особенностью наблюдаемых полей ЕП яв-

¹ Названы только основные используемые модификации электропрофилирования на постоянном токе.

ляется также связь знака аномалий с направлением фильтрации. Эта особенность положена в основу изучения характера взаимодействия подземных и поверхностных вод при разовых или режимных исследованиях [58]. Метод ЕП относится к мало-глубинным. Максимальная глубина исследования, видимо, не превышает 50 м.

При картировании наиболее водоносных участков трещиноватых и закарстованных пород может быть применена модификация метода ЕП, предусматривающая измерение разности потенциалов по нескольким (обычно четырем) азимутам. Результаты представляются в виде плана полярных диаграмм ЕП, которые анализируются с точки зрения их анизотропности [50], обусловленной изменчивостью направления основных водопроводящих путей, а также строения трещиноватого пространства и рельефа дневной поверхности или кровли коренных пород. Последние факторы образуют помехи в истолковании поля ЕП.

При измерениях потенциалов ЕП и построении карт потенциалов большее значение имеет выбор уровня нормального поля (нуль-потенциала). В практических работах ему, видимо, должен соответствовать уровень потенциала над заведомо монолитными породами, что определяет место заземления одного из электродов измерительной установки.

Метод заряженного тела

Метод заряженного тела (МЗТ) основан на изучении изменения во времени потенциального поля, происходящего в результате несущей способности подземного потока. Для выполнения съемки по этому методу используется скважина, через которую подземный поток искусственно засолоняется электролитом. Облако электролита в потоке, гальванически связанное с электродом, служит объемным источником тока. Скорость передвижения фронта электролита соответствует скорости потока. Периодические измерения потенциала этого искусственного источника на поверхности изображаются в виде полярных диаграмм потенциала, которые служат основой для определения направления выноса электролита и его скорости [42].

Возможно также использование результатов МЗТ в комплексе с данными резистивиметрии для оценки трещиноватости и кавернозности пород.

Исследования по методу заряженного тела могут осуществляться как в условиях естественного, так и нарушенного режима. Эффективность работ по методу МЗТ зависит от сопротивления породы (на уровне проникновения электролита) в условиях естественного залегания и от степени трещиноватости и кавернозности пород. Чем больше значения этих параметров, тем интенсивнее создаваемые аномалии и выше точность реги-

страции изолиний равного потенциала. С этим в известной мере связана также глубинность исследований по методу МЗТ, которая по данным разных авторов не превышает 100 м [50, 54].

Магниторазведка

С помощью измерений геомагнитного поля изучается распределение в земной коре масс различной намагниченности. В процессе магнитной съемки измеряются параметры: полный вектор, вертикальная и горизонтальная составляющие геомагнитного поля [39, 68].

С помощью таких измерений можно изучать геолого-тектоническое строение земной коры, характеризовать выходы изверженных и метаморфических пород под наносами, трассировать тектонические нарушения и другие структурные элементы [26]. Эти факторы в различных районах могут являться показателями приуроченности подземных вод. Из этих соображений методу геомагнитных измерений в комплексе геофизических исследований отводится обычно поисковая роль и соответствующие исследования производятся на первом этапе работ [44].

В зависимости от изученности, сложности геологического строения района и конкретной задачи геомагнитная съемка может производиться в среднем или крупном масштабе.

Магнитные измерения могут привлекаться также для изучения состояния трещиноватых водовмещающих пород (розы трещиноватости). Такие исследования выполняются обычно на небольших площадках в десятки и сотни квадратных метров со снятым чехлом рыхлых отложений или при небольшой мощности их. В этом случае повышаются требования к точности измерений.

Исходным материалом для интерпретации данных магниторазведки являются графики (по профилям), карт-графики и планы изолиний (по участку) измеряемых магнитных величин. В некоторых случаях могут анализироваться производные от этих величин.

Гравиразведка

На основании изучения естественного поля силы тяжести можно судить о распределении масс различной плотности, обусловленном особенностями геолого-тектонического и литолого-петрографического строения земной коры в пределах исследуемого участка [11, 67]. Эти факторы могут, в известной мере, являться показателями приуроченности подземных вод [29]. Кроме того, интенсивная трещиноватость и особенно карстообразование могут в благоприятных случаях создавать локальные объекты, обладающие заметным дефицитом плотности по отношению к первично-монокристаллическим водовмещающим породам.

Исходным материалом для интерпретации данных гравираз-

ведки являются графики и планы изолиний относительных значений силы тяжести, а также ее производные [1, 67, 68].

Сейсморазведка

В гидрогеологических исследованиях применяется корреляционный метод преломленных волн (КМПВ) [13, 14, 20, 62]. Методика работ предусматривает производство наблюдений по продольным и поперечным профилям. При этом в основном используются схемы регистрации продольных преломленных волн, хотя в последнее время начинается освоение регистрации и анализа поперечных преломленных волн, что существенно расширяет возможности сейсморазведки [20].

В результате анализа скоростей регистрируемых волн судят о глубине залегания сейсмических границ, их морфологии, составе и состоянии пород вблизи этих границ. Существенную дифференциацию в распределении скоростей упругих колебаний создает нарушение сплошности пород и их водонасыщение. В связи с этим в гидрогеологическом приложении сейсморазведка может использоваться для изучения распространения в плане и в разрезе водовмещающих коренных пород, выявления и прослеживания зон тектонических нарушений, для локализации в плане и оценки глубины распространения трещиноватости и закарстованности пород, оценки степени трещиноватости массива, определения мощности зоны аэрации [12, 14, 20, 62, 69]. В ряде случаев при интерпретации данных сейсморазведки анализируются также некоторые динамические особенности волновой картины: амплитуда, частота, затухание колебаний и др.

Системы наблюдений в зависимости от средств возбуждения, требуемой детальности исследования, а также производственных возможностей бывают различными. Однако наиболее целесообразными являются наблюдения по системе встречных и нагоняющих географов для волны, связанной с кровлей коренных пород.

В настоящее время сейсморазведка относится к наиболее трудоемкому виду геофизических работ, особенно при исследовании глубин более 15—20 м, когда для возбуждения упругих колебаний необходимо производство мощных взрывов. Поэтому сейсмические исследования выполняются по нескольким наиболее важным маршрутам. Освоение невзрывных источников упругих колебаний достаточной мощности позволит, видимо, пересмотреть глубинность и экономичность сейсмических исследований.

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВОДОВМЕЩАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Этот раздел объединяет две задачи: картирование водовмещающих пород, подверженных трещиноватости и закарстован-

ности; картирование зон повышенной водоносности, связанной с трещиноватостью и карстом.

Выделение двух задач соответствует логической последовательности проведения исследований в малоназученных районах.

Решение первой задачи предусматривает изучение общих геологических условий района исследований для ориентировки дальнейших более специальных работ, направленных на решение второй задачи. Однако и во всех других случаях эта последовательность сохраняется, возможно лишь уменьшение объема исследований, направленных на изучение отдельных элементов геологического и гидрогеологического строения.

Для решения перечисленных задач геофизические методы располагают довольно широкими техническими и методическими возможностями. В то же время они имеют свои особенности. Эти особенности состоят прежде всего в том, что значения измеряемого поля и его конфигурация могут в различных случаях определяться суммой различных по своей природе причин. Например, равные значения электрического сопротивления и закономерность его изменения по профилю могут быть обусловлены изменениями в рельефе картируемого геоэлектрического горизонта, включением объектов иной проводимости в вышележащей или исследуемой толще (в том числе связанных с обводнением пород) и т. п. Неоднозначность интерпретации геофизических показателей обуславливает необходимость проведения опорного бурения или использования данных по старым скважинам, а также комплексирования методов. В связи с этим часто бывает трудно априори регламентировать методику геофизических работ без учета конкретных структурных, литологических, геоморфологических, гидрогеологических и даже климатических особенностей изучаемой территории.

Геофизические исследования могут быть площадными и маршрутными. В результате площадных исследований строятся карты изолиний или карт-графики изучаемых геофизических параметров для исследуемой площади. В зависимости от наличия опорной геологической или гидрогеологической привязки они могут быть в дальнейшем представлены в виде карт соответствующих геологических или гидрогеологических признаков. Площадные геофизические съемки могут быть равномерными или неравномерными. В первом случае расстояния между точками наблюдения на плане примерно равны, во втором — расстояния между точками наблюдения на профиле не равны расстоянию между профилями. Выбор той или иной сети диктуется изученностью территории и потребностью конкретных гидрогеологических работ. Однако опыт показывает, что для обеспечения надежности плановых построений геофизических параметров при более или менее изометричном распределении картируемых объектов (типа замкнутых трещинно-карстовых зон) неравномерность распределения точек наблюдения не должна быть

больше 1 : 5 [44]. Масштабы площадных геофизических съемок устанавливаются в зависимости от размеров картируемых локальных объектов и требуемой точности установления их границ и могут изменяться для различных исследуемых районов (месторождений, участков) в значительных пределах: от 1 : 200 000 до 1 : 1 000 и крупнее.

В результате маршрутных геофизических исследований строятся профили (графики) изменения геофизических параметров (или разрезы) по линии наблюдения, при наличии спорных геологических и гидрогеологических данных — соответствующие им геологические или гидрогеологические признаки.

Площадные исследования обеспечивают одновременно получение данных, отвечающих маршрутным исследованиям с равной разрешающей способностью. Маршрутные же исследования ограничиваются изучением строения района в выбранных направлениях. Выбор вида геофизических работ (площадных или маршрутных) должен осуществляться, исходя из потребности в них, которая определяется реальными геологическими и гидрогеологическими условиями изучаемого района, эффективностью других исследований в данном производственном комплексе (буровых, опытно-фильтрационных), а также предполагаемым методом оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Рассмотрим возможность решения указанных задач различными геофизическими методами.

Картирование водовмещающих пород

Необходимость решения подобной задачи может возникнуть в геологически мало изученном районе или районе, имеющем сложное геологическое строение. Знание распространения различных пород в плане и в разрезе может оказаться первым ориентиром для более детальных работ, направленных на изучение условий их обводнения. Необходимые знания могут быть получены в результате использования различных геофизических методов.

Электроразведка

При использовании метода ВЭЗ в качестве интерпретационных признаков различных литолого-петрографических разностей используется величина электрического сопротивления. Разделение литолого-петрографических разностей по методу ВЭЗ возможно при условии, что они разнятся по электрическому сопротивлению по крайней мере на величину, в 2—3 раза превышающую точность его оценки по ВЭЗ с учетом влияния плановой неоднородности.

Обычный подход к рассмотрению результатов площадных

ВЭЗ предусматривает построение карты типов кривых зондирования, отражающей распространение на исследуемой площади разрезов, имеющих свои отличительные особенности. Построение этой карты дает плановую основу для последующей корреляции геоэлектрических горизонтов и осмысливания их литолого-петрографического содержания и изменчивости [25, 31].

Изучаемые разрезы в геоэлектрическом отношении в общем случае соответствуют двух— трехслойным разрезам с сопротивлением водовмещающих пород, много большим сопротивления вышележащих (обычно рыхлых) отложений. Если задача ограничивается только выяснением площади распространения этих пород и морфологии кровли, то исследования по методу ВЭЗ могут предусматривать получение асимптотических значений сопротивления, соответствующих только первому от поверхности высокоомному горизонту, расположенному ниже уровня подземных вод.

Естественной помехой геологической интерпретации таких ВЭЗ выступает водоносность, неравномерно распределенная в исследуемых породах. По величинам создаваемых аномалий водообильные участки могут быть проинтерпретированы как включения пород иного состава. Кроме того, плановая неоднородность на уровне оцениваемого горизонта может существенно исказить величину сопротивления, что также может быть воспринято как изменение литолого-петрографических особенностей. Поэтому более правильно проводить исследования по методу ВЭЗ до получения асимптотических значений сопротивления в подстилающем горизонте или в исследуемом горизонте ниже предполагаемой глубины развития трещиноватости и карста. Кроме повышения достоверности оценки состава водовмещающих пород это позволит получить представление об их мощности и глубине развития водоносности. Обычные кривые ВЭЗ в правой части соответствуют кривым типа Н, А, К с возможным появлением большего числа слов в левой части кривых.

При использовании метода ВЭЗ для картирования водовмещающих трещинных и трещинно-карстовых пород с большим сопротивлением, залегающих на разных глубинах, необходимо учитывать действие принципа эквивалентности [59]. Так при глубине залегания кровли картируемого высокоомного горизонта, большей его мощности, точность оценки сопротивления, а следовательно, и решения задачи, снижается. В числе других особенностей разреза, определяющих возможность решения задачи, являются условия залегания, по своему влиянию аналогичные изменению электрического неоднородности в плане.

Учитывая неоднозначность электрического зондирования при определении сразу двух характеристик геоэлектрического разреза: сопротивления и глубины залегания (мощности слоя), — для повышения надежности оценки величины сопротивления в методике работ обычно предусматривается создание

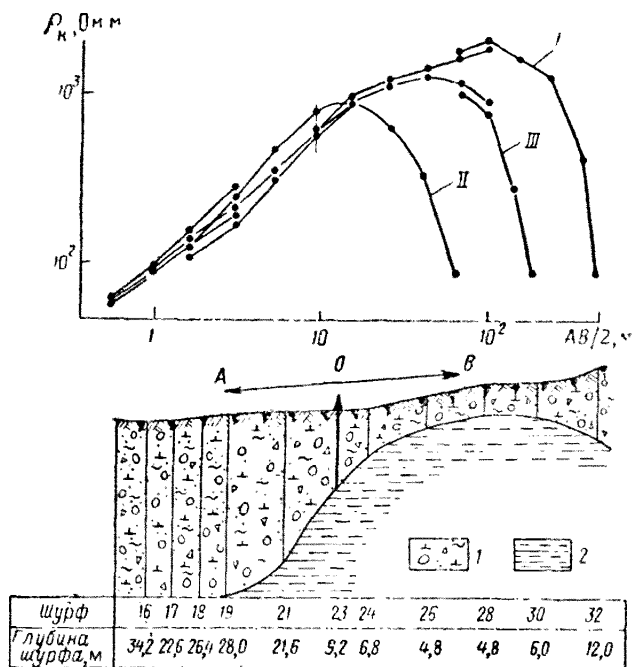


Рис. 1. Характер кривых зондирования над геологическим разрезом при наличии электрической неоднородности в плане.

I — кривая зондирования трехполюсной установкой при ориентировке линии *AO* в направлении резкого погружения кровли коренных пород; *II* — то же при ориентировке линии *OB* в направления резкого воздымания коренных пород; *III* — кривая зондирования симметричной установкой: 1 — рыхлые отложения, 2 — сланцы песчано-глинистые

опорной сети скважин. Для определения глубины залегания слоя может быть привлечена сейсморазведка. При значительной изменчивости рельефа кровли коренных водовмещающих пород исследования симметричными установками ВЭЗ дополняются исследованиями двухсторонними комбинированными (трехполюсными) установками. Либо исследования производятся несимметричными установками с последующим пересчетом замеренных сопротивлений для равновеликих симметричных установок. На рис. 1 приведены кривые ВЭЗ симметричной установкой (ВЭЗ-III) и двухсторонней трехполюсной (комбинированной) установкой (ВЭЗ-I и ВЭЗ-II), полученные в одной точке над разрезом с резким изменением рельефа кровли метаморфических пород. Расхождение координат экстремальных точек кривых зондирования указывает на изменение мощности рыхлых отложений (или их сопротивления) по направлению разносов измерительных линий.

Картирование площадей распространения пород различного литолого-петрографического состава по данным ВЭЗ имеет обычно вспомогательное значение для ориентирования дальнейших работ методом профилирования и локализации водосодержащих интервалов пород (трещинных и трещинно-карстовых).

Картировочные функции метода электропрофилирования (обычно симметричного) сводятся к электрической корреляции горизонтов, выделенных по кривым ВЭЗ в качестве водовмещающих. Выбираются размеры и количество измерительных линий. Исследования проводятся по сети профилей, обычно ориентированных вкрест простирания основных структурных элементов. Данные электропрофилирования изображаются в виде карт-графиков, что позволяет наглядно производить межпрофильную корреляцию однотипных элементов графиков [6]. В тех случаях, когда в качестве поискового критерия выступают зоны тектонических смещений, для их картирования целесообразно прибегнуть к несимметричным установкам профилирования, ориентированным вкрест простирания данных элементов. Производя такое профилирование при нескольких разносах питающих линий, можно установить направление падения тектонической зоны по смещению точки пересечения кривых сопротивления при разносах с разной глубиной исследования [5].

На рис. 2 приведен пример использования результатов, полученных дипольным профилированием с двумя разносами питающих линий, для определения направления падения зоны тектонического нарушения. Оно соответствует направлению смещения точки пересечения двухсторонних графиков сопротивления с увеличением глубинности исследования измерительных установок дипольного профилирования. Поскольку глубинность установок, приведенных в данном примере, находится приблизительно в соотношении 1 : 2, можно ориентировочно судить об угле падения тектонической зоны (см. рис. 2, б). На рис. 2, а точки пересечения совпали, что свидетельствует о почти вертикальном падении зоны тектонического нарушения.

Магниторазведка и гравиразведка

В связи с неоднозначностью электрических показаний пород различного литолого-петрографического состава в комплексе исследования в ряде случаев целесообразно использовать магниторазведку и гравиразведку. Они наиболее эффективны при картировании изверженных пород, представленных в виде лавовых покровов, даек и т. п. магматических включений в осадочные и метаморфические породы. Эти исследования носят площадной характер такого масштаба, который необходим для локализации тел заданных размеров. Интерпретационными признаками различных пород являются области различной намаг-

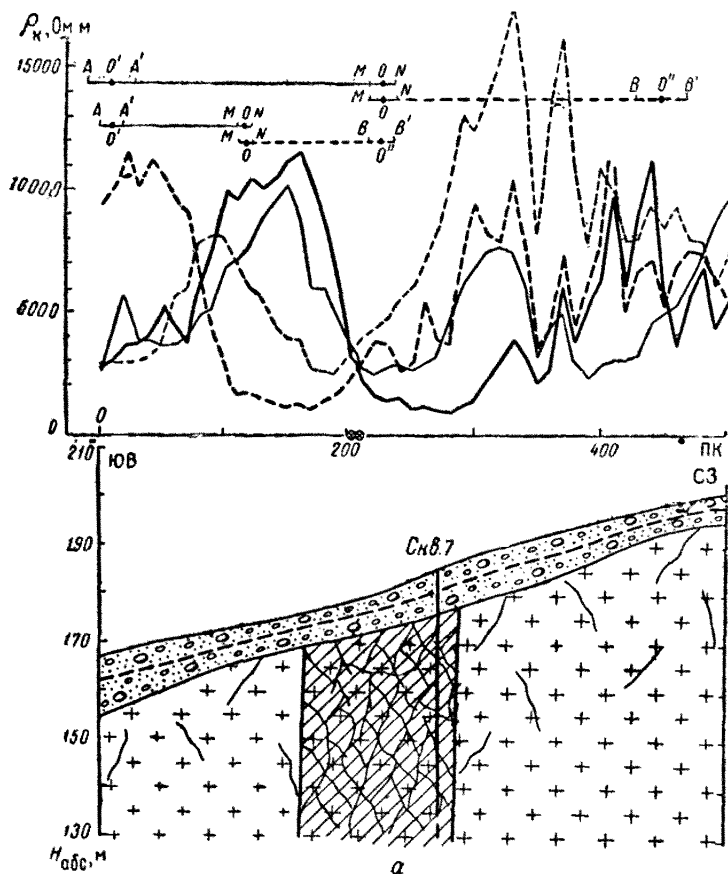
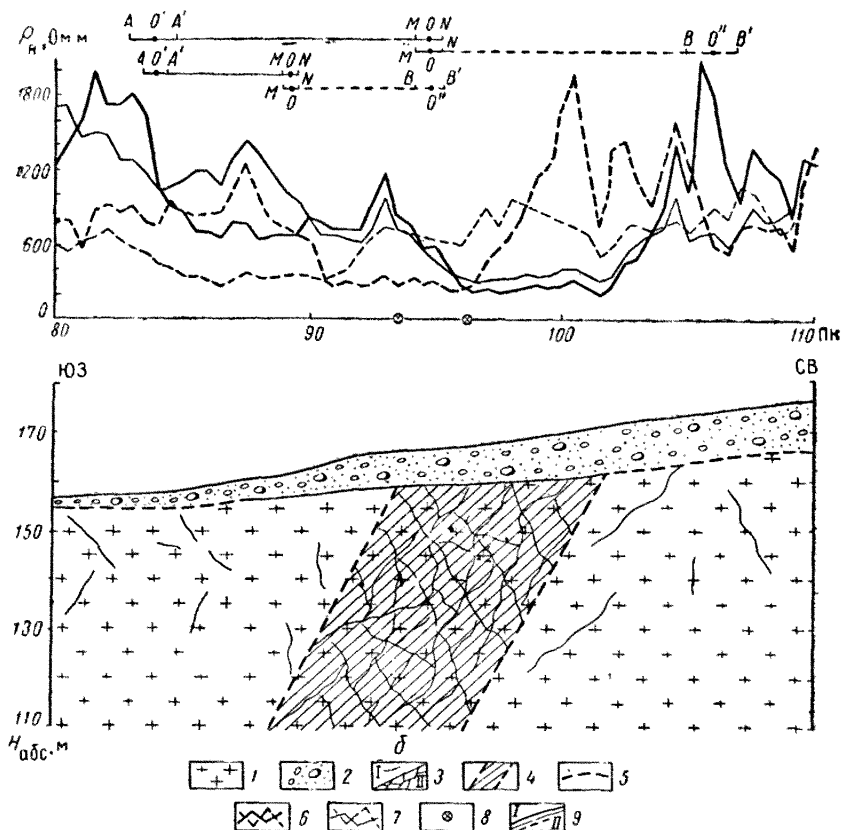


Рис. 2. Пример использования дипольного профилирования для определения (Балтий

а — при вертикальном падении разлома, б — при крутом падении разлома. 1 — гранито-
4 — зона разлома; 5 — уровень подземных вод; 6 — графики дипольного электропрофили
 $AA'=BB'=40$ м, $MN=20$ м, $OO'=220$ м; 8 — горизонтальная проекция оси проводимости
пола

ниченности и плотности, проявляющиеся на планах изолиний или карт-графиках соответствующих показаний.

Геологическая интерпретация данных гравиразведки и магниторазведки строится не только на анализе наблюдаемых значений поля. Широко используются различные приемы их трансформации и перехода к высшим производным [1, 11, 26, 31, 39, 68]. Как показывает опыт картирования многих водовмещающих трещиноватых и карстующихся пород различного литолого-петрографического состава, они характеризуются слабой магнитной и плотностной дифференциацией. Поэтому в анализе данных наблюдения прежде всего отражаются морфологические особенности рельефа этих пород под чехлом нано-



условий залегания зон трещиноватости, связанных с разломами (схематический щит).

гнейсы; 2 — моренные отложения; 3 — трещиноватость: I — слабая, II — интенсивная; 4 — трещиноватость: I — установленная по данным ВЭЗ, II — предполагаемая; 5 — трещиноватость: I — установленная по данным ВЭЗ, II — предполагаемая; 6 — трещиноватость: I — установленная по данным ВЭЗ, II — предполагаемая; 7 — то же установкой на профиле; 8 — то же установкой на профиле; 9 — кровля коренных пород: I — установленная по данным ВЭЗ, II — предполагаемая.

сов. Указанное обстоятельство имеет весьма важное значение, так как облегчает интерпретацию данных электроразведки. В то же время морфологические особенности имеют самостоятельное картировочное значение, поскольку изменения в рельефе коренных пород часто являются индикатором тектонических явлений.

На рис. 3 приведены результаты электропрофилирования и гравиразведки. Планы изоом и W_{zz} (третья производная силы тяжести) довольно хорошо дублируют друг друга. Особенно интересно обратить внимание на характер кривой ρ_k , Δg и рельеф фундамента, представленного гранитами и гнейсами. Как видно, кривая Δg практически повторяет его форму. Подтвержден

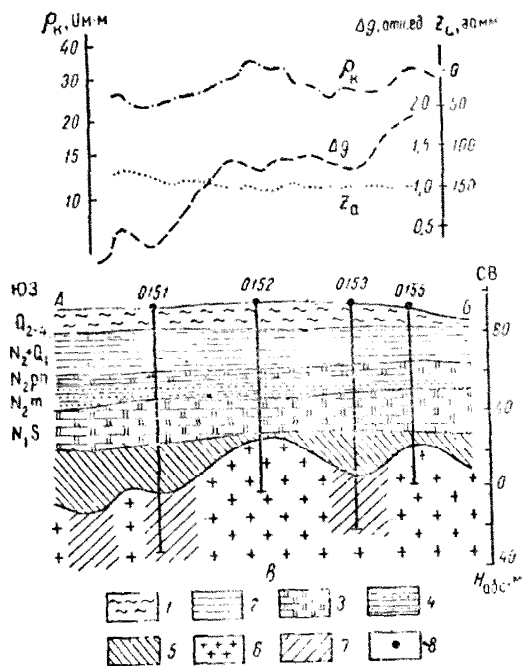
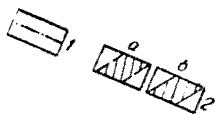
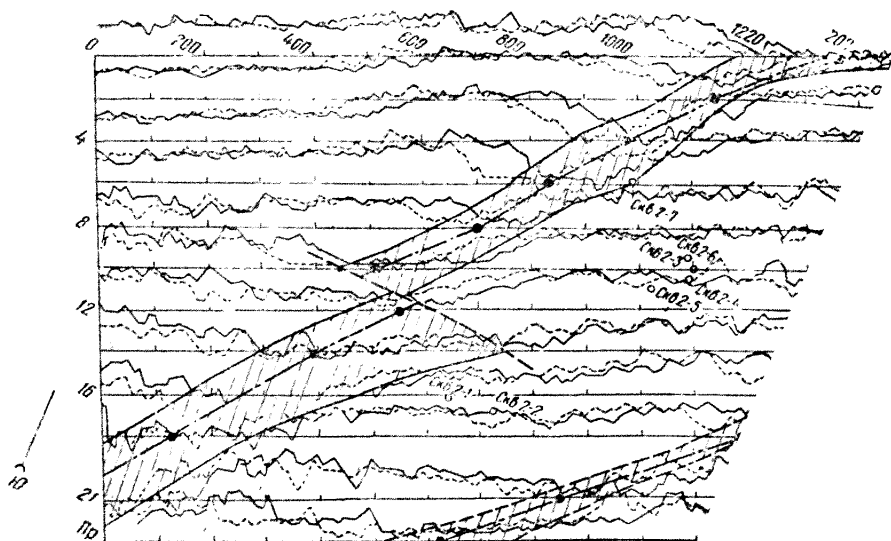
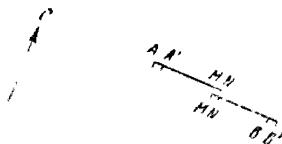


Рис. 3. Пример использования данных электропрофилирования и гравиразведки для картирования кровли кристаллических пород и зон разломов (Украинский кристаллический щит).

а — план изотиний W_{zzz} в отн. ед. $\times 10^{-14}$, б — план изоом ρ_k по данным симметричного электропрофилирования при $AB=600$ мм; в — геологический разрез по линии АБ с данными маршрутных электропрофилирования ρ_k , гравиметрических Δg и магнитометрических Z_a исследований. 1 — суглинки, 2 — глины; 3 — карбонатные породы; 4 — переслаивающиеся песчано-глинистые сложенные; 5 — кора выветривания; 6 — гнейсы; 7 — зоны разломов; 8 — скважина



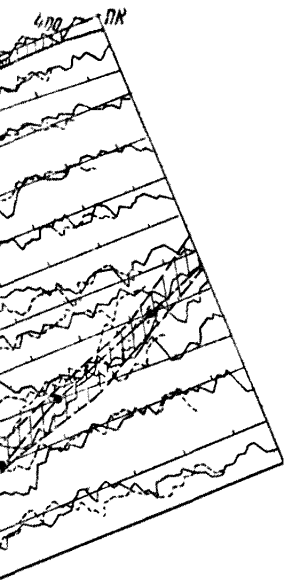
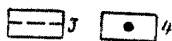


Рис. 4. Пример выявления зон тектонических разломов и смещений пород по данным дипольного электропрофилирования (Кольский полуостров).

1 — оси проводимости в плане; 2 — зоны пониженных сопротивлений, контролирующие разломы: а — предполагаемые, б — установленные; 3 — линия разрывного нарушения; 4 — оси проводимости на профиле



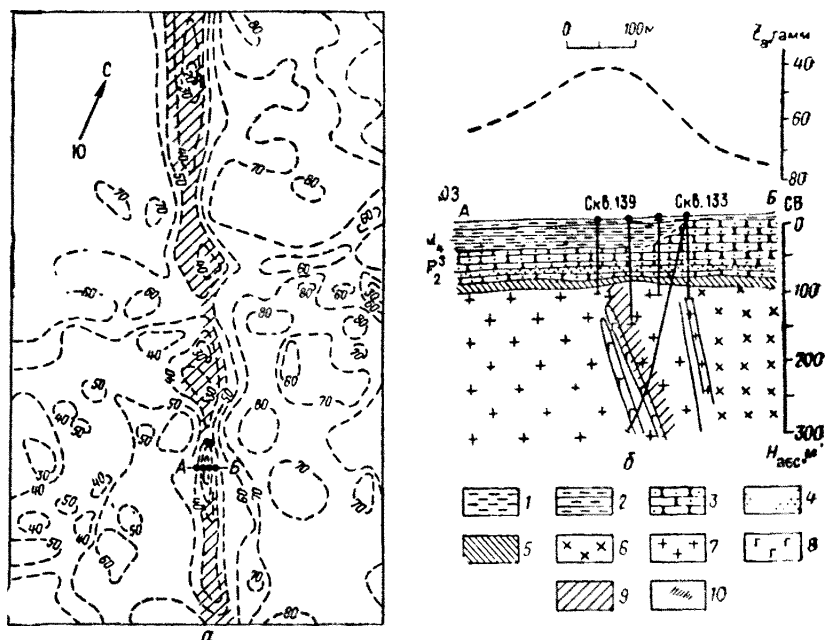


Рис. 5. Пример картирования зон разломов по данным магниторазведки (Украинский кристаллический щит).

a — план изодинам Z_a ; *b* — схематический разрез по линии А — Б. 1 — супесь; 2 — алевритисто-глинистые отложения; 3 — песчанник глауконито-кварцевый; 4 — песок кварцевый; 5 — кора выветривания; 6 — гнейс гранато-биотитовый; 7 — гранит среднезернистый с зернами гранита; 8 — гранит мелкозернистый аплоидный; 9 — дайки пироксенового диабазы; 10 — тектоническая зона

также факт пруроченности понижений в рельефе фундамента к зонам нарушения сплошности пород (скв. 0151).

В результате анализа планов изолиний или карт-графиков показаний электрических и гравимагнитных исследований могут быть выявлены непосредственные качественные признаки тектонических смещений различных блоков пород в изучаемом массиве. Наиболее очевидными признаками являются «разрыв» или смещение в плане изолиний поля, резкое изменение градиентов поля в некоторых направлениях, амплитуды или ширины аномалий и т. п. Иллюстрацией сказанному может служить пример, приведенный на рис. 4, где по резкому смещению оси проводимости, трассирующей крупную тектоническую зону разломов юго-западного простирания, выявлено разрывное нарушение юго-восточного простирания с амплитудой около 120 м. На основании увеличения горизонтальной мощности трассируемой зоны к юго-западу от линии секущего разлома, кроме горизонтального смещения можно предположить наличие вертикального смещения блоков.

Необходимо отметить некоторые дополнительные условия,

благоприятствующие применению гравимагнитных исследований при картировании тектонических нарушений. Речь идет об изменениях в приконтактных зонах магматических и метаморфических пород или в зонах тектонических смещений, сопровождающихся обогащением их ферромагнитными минералами или утратой остаточной намагниченности в результате катаклаза или милонитизации.

В иных случаях интенсивное раздробление пород может вызвать заметное уменьшение объемной плотности в зоне контакта. Эти факторы в ряде случаев позволяют эффективно применять гравимагнитные исследования в районах развития карбонатных и осадочно-метаморфических пород.

На рис. 5 показан пример обнаружения тектонической зоны в кристаллических породах по данным высокоточной магнитной съемки, результаты которой подтверждены контрольным бурением. Зона выделяется на плане изолиний протяженной (более 15 км) и узкой (200—400 м) слабоинтенсивной магнитной аномалией на фоне практически немагнитных гранато-биотитовых гнейсов и среднезернистых гранитов. На плане Z_a ей соответствуют пониженные значения Z_a в области отрицательных значений поля. Выделенная зона местами тяготеет к приконтактной части гранитных массивов (имеющих островной характер) с гнейсами. Один из таких приконтактных участков детально разбурен для выяснения природы магнитной аномалии. Наклонной скв. 133 в интервале 220—245 м встречена зона интенсивно трещиноватых гранитов и гнейсов. К зонам нарушения приурочены дайки диабазов, являющиеся магнитными в отличие от других пород. Они то и являются своеобразной магнитной меткой зон разломов. Скважина вскрыла напорные воды с дебитом самоизлива 720 л/ч. Эта же зона дробления пород подтверждена скв. 139.

Сейсморазведка

Использование сейсморазведки как дополнительного картографического метода по технико-экономическим соображениям обычно ограничивается маршрутными исследованиями. Вместе с тем сейсморазведка является одним из методов, которые наиболее достоверно определяют глубину залегания коренных карбонатных, осадочно-метаморфических и кристаллических пород, локализуют зоны тектонических смещений и дробления пород. В числе обстоятельств, выдвигающих этот метод в ряд наиболее перспективных, необходимо назвать отсутствие (или, по крайней мере, меньшее влияние) искажений сейсмических характеристик, связанных с условиями залегания картируемых объектов, а также условиями измерения.

Кровля коренных карбонатных, метаморфических и изверженных пород является сильной преломляющей границей [62].

Обычно для ее выделения и прослеживания используются продольные преломленные волны, поскольку их возбуждение и регистрация проще. Система наблюдений предусматривает получение встречных и нагоняющих годографов для опорной преломленной волны. Признаками соответствия коррелируемой преломленной волны¹ кровле коренных пород часто являются криволинейный или даже изломанный вид оси синфазности, а также непараллельность нагоняющих и нагоняемых годографов, обусловленная эффектом проникания. Этот эффект возникает в результате градиентности сейсмических свойств верхней части коренных пород (кора выветривания, трещиноватость), обычно монотонно затухающих с глубиной.

Волна, которая отвечает кровле коренных пород, обладает обычно максимальной скоростью (по сравнению с волнами от других поверхностей). Граничные скорости изменяются от 2000—3000 м/с в выветрелых известняках и мергелях до 5000—6000 м/с в плотных изверженных и метаморфических породах [44, 59, 62].

Построение преломляющей границы осуществляется обычно способом средних скоростей [13]. Глубина залегания H границы определяется по формуле

$$H = \frac{v_{cp} t_0}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{v_{cp}}{v_r} \right)^2}}, \quad (1.1)$$

где v_{cp} — средняя скорость преломленной волны до преломляющей границы; v_r — граничная скорость волны вдоль этой границы; t_0 — время, отсекаемое на оси ординат (времен) продолжением годографа соответствующей преломленной волны [13].

Величина средней скорости преломленной волны до картируемой преломляющей границы определяется обычно по точке пересечения годографов, соответствующих картируемому и перекрывающему его горизонтам. Однако указанный способ в случае градиентного изменения скоростей в перекрывающем слое может давать погрешности в величине средней скорости и, как следствие, в глубине до преломляющей границы. Поэтому в таких условиях средняя скорость определяется по способу О. К. Кондратьева [20, 62]. В случае, когда перекрывающая толща представлена несколькими геологическими слоями с существенно различными упругими свойствами, при определении глубины залегания кровли коренных пород прибегают к способу пластовых скоростей, в котором указанные построения осуществляются последовательно от слоя к слою [20, 40].

Поперечные волны в перекрывающих рыхлых отложениях характеризуются скоростями, в 1,5—3 раза меньшими продоль-

¹ Фактически данная волна чаще всего является не чисто преломленной, а преломленно-рефрагированной.

ных, что при прочих равных условиях обеспечивает большую точность оценки глубины залегания кровли коренных пород по поперечным волнам. Этим волнам отдается предпочтение в тех случаях, когда методикой работ предусматривается одновременное получение продольных и поперечных волн, например при определении мощности зоны аэрации [20].

В настоящее время применение сейсморазведки для целей картирования водовмещающих пород сдерживается отсутствием специально разработанной аппаратуры, а также необходимостью использования взрывов или других мощных источников возбуждения при исследовании глубин более 15 м.

Картирование зон повышенной водоносности, связанной с трещиноватостью и карстом

Картирование зон повышенной водоносности обычно является основной задачей при разведке подземных вод геофизическими методами. Успех решения этой задачи определяет выбор участков для заложения эксплуатационных скважин, обоснованность гидродинамической схемы и достоверность гидрогеологических прогнозов [4, 7, 56, 57]. Геофизические критерии аномальной водоносности в пределах площади распространения коренных водовмещающих пород весьма разнообразны, но могут быть неоднозначными. Это предопределяет необходимость применения комплекса геофизических методов и в ряде случаев проверочного бурения.

Рассмотрим последовательно критерии обводненности различных трещинных и трещинно-карстовых пород, выявляемые по данным геофизических методов.

Электроразведка

На кривых ВЭЗ и графиках симметричного профилирования участки развития трещинных и трещинно-карстовых вод соответствуют обычно областям пониженных сопротивлений [30, 45, 50, 65, 74]. Генетически эти участки часто тесно связаны с тектоническими трещинами, что на планах изомов отображается в виде ориентированных в пространстве аномалий и может служить дополнительным поисковым признаком (см. рис. 3). Успех обнаружения таких аномальных участков только по данным ВЭЗ, кроме уже указанных факторов (условие эквивалентности, плановая неоднородность), определяется соотношением плотности точек наблюдения и размеров предполагаемых водоносных зон. Обычно обнаружение аномальных участков может считаться уверенным при условии получения двух-трех асимптотических значений сопротивления в пределах картируемой зоны, характерных для данного объекта. Поскольку обеспечение необходимой плотности точек наблюдения ВЭЗ при выявлении

участков для заложения скважин часто требует больших затрат времени и средств, назначение метода ВЭЗ при картировании обычно сводится к созданию основы для постановки электропрофилирования (обычно с двумя разносами линии АВ). На основании предварительных данных ВЭЗ большие разносы линии АВ установки электропрофилирования выбираются из расчета получения значений сопротивления, соответствующих верхней части разреза коренных пород, в пределах предполагаемой глубины развития трещиноватости и карста. Меньшие разносы выбираются из расчета получения сопротивлений, соответствующих перекрывающим отложениям.

В качестве дополнительного признака возможной водоносности пород, связанной с трещиноватостью и карстообразованием, может быть названа морфологическая характеристика кровли водовмещающих пород. Зоны трещиноватости и карста, связанные с древней эрозионной сетью, как правило, характеризуются локальными понижениями рельефа кровли коренных пород и увеличением мощности наносов. Если при этом трещиноватость или карст развиты не на всю мощность водовмещающего горизонта коренных пород, на кривых ВЭЗ, полученных над указанными депрессиями в рельефе или в пределах зон пониженного сопротивления, могут наблюдаться локальные минимумы сопротивления на фоне максимума, соответствующего высокоомному горизонту вмещающих пород [50]. Закономерное расположение таких кривых ВЭЗ в депрессиях кровли или зонах пониженного сопротивления коренных водовмещающих пород является уверенным индикатором водоносной зоны. Часто участки с минимумами на кривых ВЭЗ не могут быть уверенно проинтерпретированы количественно. Тем не менее по ним можно составить представление об ориентировочной глубине развития трещиноватости.

Наиболее уверенно трещинные и карстовые водонасыщенные зоны выделяются по данным двухстороннего дипольного или комбинированного электропрофилирования [5, 6, 50]. Середина этих зон в плане четко отмечается точкой пересечения кривых, что позволяет уверенно картировать оси трещиноватости или линии тектонических нарушений. Это даст преимущества несимметричным установкам электропрофилирования. Однако горизонтальная мощность трещиноватых зон по данным несимметричного электропрофилирования определяется менее четко. Поэтому на практике исследования целесообразно проводить несимметричными установками, а сопротивление, соответствующее симметричному профилированию, получать путем пересчета.

В качестве индикатора водоносных зон трещиноватости и карста могут быть использованы результаты круговых электрозондирований или профилирования. В полярных диаграммах сопротивления отражается электрическая анизотропия пород.

Если исследования проводятся на площадях развития сплошных массивов скальных пород, эллиптичность полярных диаграмм может быть вызвана только ориентированной интенсивной трещиноватостью. При этом значение имеет только система крутопадающих трещин. Над участками ненарушенных пород полярные диаграммы приобретают форму кругов.

Анализ эллиптичности полярных диаграмм круговых ВЭЗ может позволить оценить глубину развития трещиноватости. Для этого рассматривается так называемая кажущаяся анизотропия, равная отношению большой оси эллипса к малой, представленная как функция полуразносов линии АВ. Затухание кажущейся анизотропии свидетельствует о монолитности пород на рассматриваемой глубине.

Искажающими факторами, также способствующими возникновению эллиптических или более сложных форм полярных диаграмм, являются различные проводящие и непроводящие неоднородности: контакты сред с различной электропроводностью, включения линз или даек, неровности в рельефе местности и др. [64]. Круговые исследования, выполненные несимметричными установками, в меньшей степени подвержены искажающему влиянию неоднородности среды в плане, что дает им дополнительные преимущества перед симметричными установками [50].

Исследования круговыми установками профилирования или ВЭЗ по технико-экономическим соображениям обычно производятся в отдельных пунктах или по редкой сети с точками наблюдения, приуроченными к зонам пониженных сопротивлений, установленным ранее площадными работами.

Обнаружение описанных критериев водоносности трещиноватых пород по данным электроразведки возможно не во всех случаях. Благоприятными являются условия, когда водоносность связана с отдельными локальными зонами интенсивной трещиноватости и закарстованности и создает по отношению к ненарушенному первично-монолитному массиву резкую дифференциацию по сопротивлению. Такие условия возникают обычно в мощных толщах карбонатных и изверженных пород с неглубоким залеганием кровли и близким к дневной поверхности уровнем подземных вод.

На рис. 6 приведены результаты картирования зон трещиноватости и закарстованности известняков методами ВЭЗ, КВЭЗ и комбинированного профилирования. Сопоставление геологической карты и карты изоом по данным электропрофилирования показывает их полное соответствие. По данным комбинированного профилирования уверенно трассируется ось проводящей зоны, соответствующая направлению депрессии в рельефе коренных пород и, очевидно, оси их трещиноватости. Наличие локального минимума на кривых зондирования при полуразносах 150—200 м также указывает на развитие трещи-

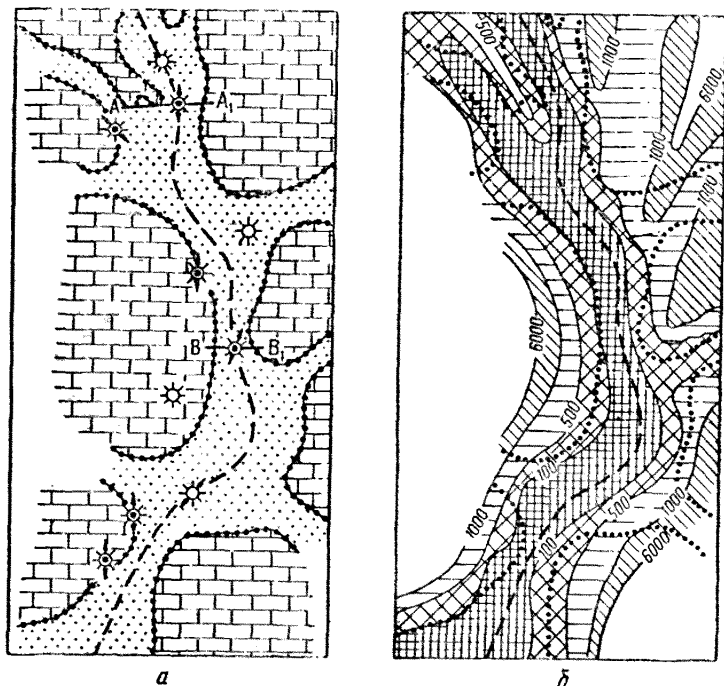


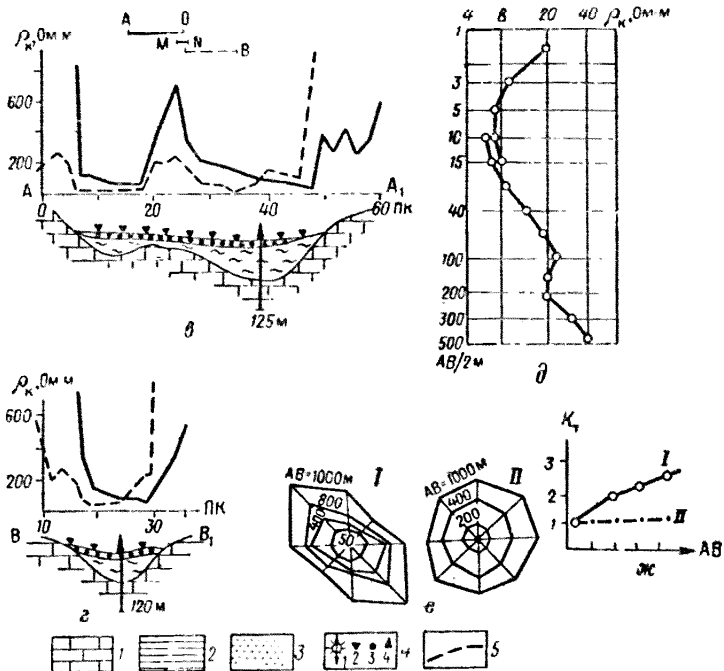
Рис. 6. Пример картирования зон трещиноватости известняков

а — схематическая геологическая карта; *б* — план изом по данным двухстороннего с графиками комбинированного электропрофилирования; *г* — то же по профилю В-В₁; круговых ВЭЗ; *1* — у скважины на профиле А-А₁, *II* — на обнажении плотных нерас *I* и *II*.

1 — известняки; *2* — третичные пестроцветные глины; *3* — покровные отложения; *4* — пункт гидрогеологические скважины на плане (*3*) и на разрезе (*4*); *5* — оси проводимости

новатости и закарстованности коренных пород. Наконец, бесспорным доказательством трещиноватости пород является получение эллиптических полярных диаграмм сопротивления при круговых исследованиях в районе депрессии. Причем величина эллиптичности показывает, что трещиноватость развита на значительную глубину. Скважины, заданные по оси выделенной депрессии, вскрыли трещиноватые породы с хорошими фильтрационными свойствами.

В терригенно-метаморфических породах, представленных переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами, дифференциация по сопротивлению между ненарушенными и нарушенными участками может оказаться близкой к дифференциации, обусловленной литологической неоднородностью водовмещающих пород. Значительное погружение водовмещающих пород под наносы способствует нивелировке различных неоднородностей по сопротивлению в измерениях с дневной поверхности. Кроме того, относительное уменьшение размеров картируемых объектов по отношению к глубине их



по данным электроразведки (по данным Т. А. Акишева).

комбинированного электропрофилирования; θ — геологический разрез по профилю А—А₁; δ — кривая зондирования в зоне пониженных сопротивлений; ϵ — полярные диаграммы рушенных известняков; κ — графики коэффициента анизотропии по круговым ВЭЗ — ты круговых ВЭЗ с направлением трещиноватости (I), пункты ВЭЗ на разрезах (2); по данным комбинированного электропрофилирования

залегания увеличивает вероятность пропуска этих объектов. В ряде случаев могут возникнуть благоприятные предпосылки для привлечения к картированию метода естественных потенциалов. Такие предпосылки обнаруживаются в долинах рек, дренирующих подземные воды коренных отложений, на участках интенсивной инфильтрации поверхностных вод в трещинные и карстовые зоны, залегающие ниже базиса эрозии. Значительные скорости фильтрации вод и в том и в другом случае являются определяющим фактором в создании заметных аномалий естественного электрического поля. Характерно, что в знаке аномалий отражается направление фильтрации, что также используется при геофизических исследованиях [50, 58, 63].

В результате построения карты равных потенциалов могут быть околтурены зоны с наибольшим градиентом скорости фильтрации подземных вод. Очевидно, что именно они представляют наибольший поисковый интерес. Поле естественных потенциалов в трещиноватых и карстовых массивах анизотропно.

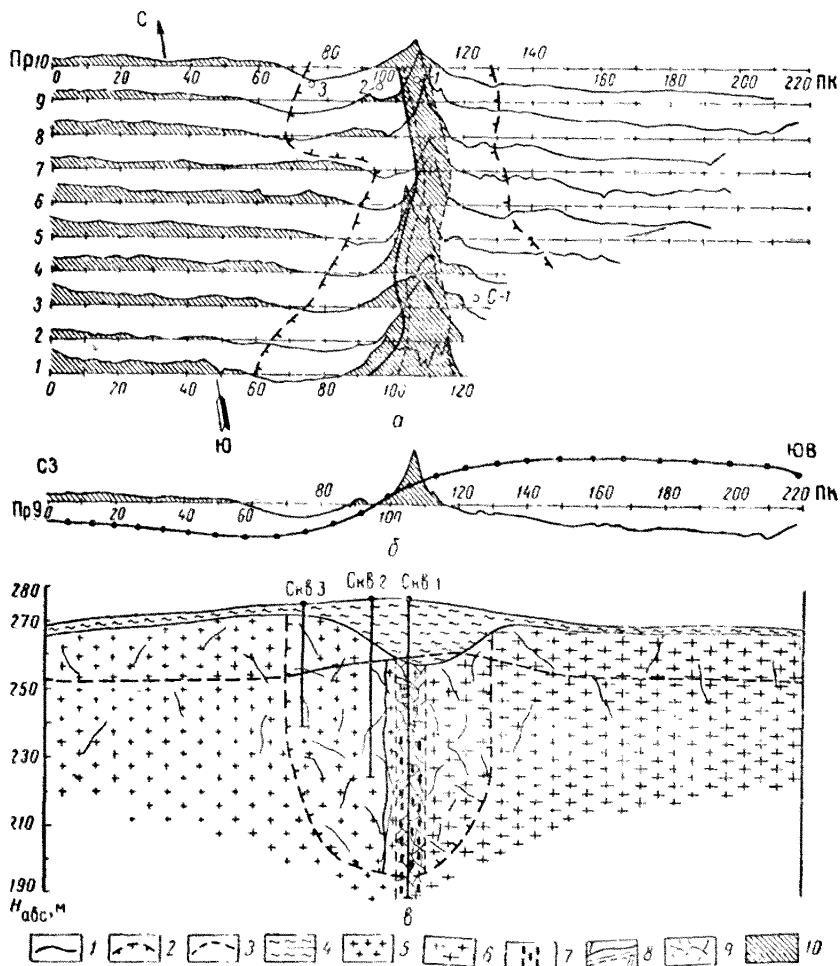


Рис. 7. Пример картирования зон распространения трещинных вод, связанных с разломом, по данным гравиметрических исследований (Средний Урал).

а — карт-географии Z_a ; б — гравиметрические наблюдения по профилю 9; в — геологический разрез. 1 — линия контакта интрузии гнейсо-гранитов с вмещающими кристаллическими сланцами и гнейсами силура; 2 — граница зоны развития трещинно-жильных вод; 3 — граница наиболее водообильной полосы в пределах зоны развития трещинно-жильных вод; 4 — глины и суглинки покровные и древней коры выветривания; 5 — гранито-гнейсы; 6 — кристаллические сланцы и гнейсы силура; 7 — сульфидная вкрапленность; 8 — уровень подземных вод: I — установленный, II — предполагаемый; 9 — трещиноватость в кристаллических породах; 10 — положительные аномалии Z_a .

По направлению движения подземных вод значение амплитуд разности потенциалов возрастает. Это используется при площадных круговых измерениях. По картам эллиптичности полярных диаграмм разности потенциалов могут быть оконтурены зоны наиболее интенсивной фильтрации подземных потоков [50]

Использование гравиметрических и магнитометрических исследований основывается на приуроченности повышенной водоносности к зонам тектонических нарушений, к контактам изверженных и осадочных пород и т. п. Соответственно область использования этих методов ограничивается прежде всего районами развития кристаллических пород и активной тектонической деятельности.

Данные гравиразведки в ряде случаев могут быть непосредственно использованы для локализации зон трещиноватости и закарстованности. Опыт использования таких данных пока невелик, однако имеющиеся примеры свидетельствуют в пользу метода гравиметрических измерений в связи с возможностью при некоторых обстоятельствах получить оценку глубины нижней границы эффективной трещиноватости.

На рис. 7 приведены результаты гравимагнитных исследований, направленные на картирование зон развития трещинных вод в одном из районов Среднего Урала. По данным площадной магнитной съемки в центральной части участка выделяется линейно вытянутая положительная магнитная аномалия напряженностью до 700 гамм. Ей соответствует зона развития трещинно-жильных вод, приуроченная к контакту гнейсо-гранитов и кристаллических сланцев силура, которые также четко разделяются в магнитном поле. Природа аномальной напряженности магнитного поля над зоной развития трещинно-жильных вод обусловлена обогащением наиболее трещиноватых и обводненных кристаллических сланцев в экзоконтакте рудными (пирит-пирротин) минералами.

Скв. 1, заданная в пределах магнитной аномалии, имеет дебит около 2000 м³/сут, тогда как дебиты скв. 2 и 3, заданных к западу от магнитной аномалии, не превышают 200—300 м³/сут.

Данные гравиразведки также четко фиксируют контакт между интрузивными и метаморфическими породами, поскольку они характеризуются существенно различной плотностью.

Сейсморазведка

Исследованиями последних лет доказана возможность успешного использования сейсморазведки для выявления водоносных зон, приуроченных к тектоническим нарушениям в скальных породах (кристаллических, метаморфических, карбонатных), и оценки некоторых важных структурных характеристик водовмещающей среды [62]. В качестве интерпретируемых показателей на данном уровне развития гидрогеологической сейсморазведки используются скоростные характеристики продольных и поперечных волн. Сравнительный анализ скоростей продольных и поперечных волн позволяет составить суждение

о характере заполнителя трещин и тем самым уточнить перспективы выявленных трещиноватых интервалов пород.

Так монолитные породы обладают высокими значениями скоростей продольных (v_p) и поперечных (v_s) волн при отношении $v_s/v_p \approx 0,5 \div 0,6$ [62]. В трещиноватых породах значения v_p и v_s по абсолютной величине существенно меньше, при этом в трещиноватых неводонасыщенных породах величина отношения v_s/v_p близка к величине аналогичного отношения в монолитных породах. При заполнении трещин водой особенно резко происходит снижение значений скоростей поперечных волн (по сравнению со скоростью в монолитной среде), так что отношение v_s/v_p становится ниже указанных величин. Заполнение пустотного пространства мелкообломочным материалом создает среду с промежуточными значениями скоростей v_p и v_s и их соотношений в сравнении со скоростями и их соотношениями, получаемыми между монолитными и водоносными породами. При практическом использовании этих показателей для дифференциации пород по характеру заполнителя трещиноватого пространства желательно в опытным порядке установить примерные пределы их изменения в каждом конкретном районе или для различных типов пород. Особенно нужно подчеркнуть, что по сейсмическим данным возможно с высокой точностью установить рельеф коренных пород, наследующий в своих формах результаты тектонической и эрозийной деятельности.

Сейсмические исследования водоносности трещиноватых и закарстованных пород в силу ряда причин технического и экономического характера следует рассматривать как вспомогательные, призванные в случае необходимости повысить однозначность гидрогеологической интерпретации данных электрических и гравимагнитных исследований в неблагоприятных для этих методов условиях.

Суждение об аномальной водоносности выделяемых зон трещиноватости или закарстованности скальных пород по данным геофизических исследований, кроме исследований методом ЕП, в большинстве случаев является вероятной оценкой их перспективности. Это очевидно, так как водоносность участвует в формировании значений физических свойств среды неоднозначно. Во многих районах эта вероятность очень высокая. Однако почти во всех рассмотренных видах геофизических исследований нередки случаи, когда, например, глинистый заполнитель трещин и карста принципиально приводит к тому же эффекту, что и вода. Разделение трещиноватых и закарстованных зон по степени перспективности представляет самостоятельную задачу, которая может быть разрешена проверочным бурением или специально поставленными геофизическими исследованиями.

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТОЯНИЯ ВОДОВМЕЩАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Необходимость выделения этого круга вопросов для решения их геофизическими методами исследования с поверхности продиктована желанием предварительно, до постановки более «тяжелых» видов исследования, получить представление: об анизотропии физических свойств, связанной с трещиноватостью, отражающей характер и интенсивность тектонической деятельности в районе, а также пути фильтрации подземных вод и их связь с пограничными источниками восполнения запасов; о степени трещиноватости пород, дающей представление о статических запасах подземных вод и возможной водоотдаче пород; о характере заполнителя трещин и карста, что позволяет оценить перспективы выделенных зон трещиноватости для организации водоснабжения; о положении точек, наиболее благоприятных для заложения буровых скважин на воду.

Надо сказать, что опыт решения указанных вопросов еще недостаточен, однако имеющиеся успехи позволяют рекомендовать для использования некоторые оправдавшие себя приемы. Исходным материалом для выполнения соответствующего анализа могут быть результаты наблюдений, осуществленных при решении предыдущих задач, либо специально выполненных в пределах закартированных зон повышенной трещиноватости и закарстованности.

Изучение анизотропии

Электроразведка

Выше было сказано, что результаты кругового вертикального зондирования содержат информацию об электрической анизотропии массива, обусловленной развитием систем трещин.

В связи с действием парадокса анизотропии большая ось эллипса полярных диаграмм сопротивления направлена вдоль простирания господствующей трещиноватости, а малая — перпендикулярно к ней. Если трещиноватость развита в нескольких направлениях, большая ось будет соответствовать направлению условной трещиноватости, получаемой аналогично сложению векторов. В случае, если трещиноватость по интенсивности и другим показателям во взаимно перпендикулярных направлениях развита в равной мере полярные диаграммы примут форму кругов, отражая изотропность трещиноватых пород. Анализ полярных диаграмм для различных размеров измерительных установок позволяет изучать изменчивость направления трещиноватости в вертикальном разрезе. Наиболее благоприятными геологическими условиями для выполнения круговых исследований являются массивы скальных карбонатных или

кристаллических пород. Имеются примеры удачного применения круговых зондирований для изучения трещиноватости в толщах перемежающихся консолидированных пород терригенно-метаморфического типа.

Круговые исследования методом ВЭЗ для изучения анизотропности трещиноватых пород обычно относятся к специальным исследованиям, выполняемым на участках, выделенных по данным других методов как водоносные (см. рис. 6). Однако встречаются случаи, когда возникает необходимость планомерного исследования площади круговыми зондированиями. Такие исследования могут выполняться на полях шахт и карьеров, в связи с проектированием строительства промышленных и гражданских сооружений или организацией водопонижительной системы.

Простирание доминирующей трещиноватости пород может изучаться также по данным разнонаправленного электропрофилирования симметричной установкой [52]. Исследования выполняются на площади по равномерной сетке профилей, ориентированных на плоскости по нескольким, обычно четырем, направлениям под углом 45° друг к другу. По результатам профилирования для каждой системы параллельных профилей подсчитывается коэффициент вариации измеренных сопротивлений

$$V = \frac{\sigma}{\rho_{к.ср}}, \quad (1.2)$$

где V — коэффициент вариации; $\rho_{к.ср}$ — среднее арифметическое значение кажущегося сопротивления, равное $\Sigma \rho_k / n$;

σ — среднее квадратическое отклонение кажущихся сопротивлений;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (\rho_k - \rho_{к.ср})^2}{n - 1}};$$

ρ_k — измеренное кажущееся сопротивление; n — число точек измерений кажущегося сопротивления на профилях данной системы.

Результаты расчета изображаются в виде полярных диаграмм коэффициента вариации, который также отражает электрическую неоднородность среды по направлениям измерений и будет максимальным в направлении, перпендикулярном к господствующей трещиноватости.

Указанные исследования обычно сосредоточиваются в пределах выделенных перспективных зон. По каждому участку, имеющему обычно размеры от 100×100 до 500×500 м, подсчитывается одно значение коэффициента вариации. Для изучения изменений направления трещиноватости в плане исследования производятся по сетке участков, расположенных равномерно на площади, или в соответствии с геолого-структурным строением района. Выбранные для исследования участки должны

характеризоваться равнинным рельефом; величина разностей линии *AB* должна соответствовать глубине залегания изучаемых зон трещиноватости.

Сведения о направлении трещиноватости также могут быть получены из анализа круговых измерений разности естественных потенциалов фильтрационного происхождения. Нужно, однако, иметь в виду, что эллиптичность полярных диаграмм разности естественных потенциалов отражает прежде всего направление потока подземных вод. В некоторых случаях, например в пределах Александрово-Невского месторождения подземных вод в Иркутской области, по данным метода заряженного тела было установлено, что направление потока подземных вод при естественных градиентах давления и направление господствующей трещиноватости пород взаимно перпендикулярны. Однако такие случаи относительно редки.

Сейсморазведка

В последнее время активно разрабатываются вопросы методики гидрогеологической и инженерно-геологической сейсморазведки, направленной на исследование структуры и состояния трещиноватых пород [62]. Эти исследования основываются на анализе особенностей упругих колебаний различной частоты. Так, очевидный факт, что преобладающая ориентировка трещин отражается на характере индикатрис скоростей упругих волн, недостаточно однозначно отвечает на поставленный вопрос без анализа соотношения частот заданных колебаний и размеров трещинного пространства [60]. Как показано в работе [62], если длина волны соизмерима или меньше размеров отдельных структурных элементов, обусловленных трещиноватостью, среда может рассматриваться как неоднородная с макровключениями, характеризующимися иными упругими свойствами. Индикатрисы скоростей в монолитных блоках этой трещиноватой среды укажут на наличие повышенных скоростей в направлении перпендикулярном к направлению трещиноватости, и низких — по направлению трещиноватости при измерении скоростей на базах, меньших размеров неоднородностей. При использовании волн с длиной, существенно большей размеров элементов трещиноватости, исследуемая среда будет выглядеть как трансверсально-изотропная (квазианизотропная). В такой среде скорость распространения волн по направлению трещиноватости будет больше.

Реализовать исследования, рассматривая первый вариант среды, возможно, лишь прибегая к ультразвуковому диапазону частот (более 10 кГц), производя измерения на образцах, обнажениях, в горных выработках и т. п. При исследованиях в сейсмическом диапазоне частот (до 500 Гц) представляется возможным оперировать понятием о квазианизотропности среды.

В соответствии с изложенным использование сейсморазведки для изучения ориентировки трещиноватости может производиться по разнонаправленным профилям с представлением результата в виде индикатрис скоростей. По соображениям технико-экономического характера использование метода сейсморазведки для этих целей видимо пока не может конкурировать с другими геофизическими методами исследования.

Оценка степени трещиноватости пород

Данные геофизических методов исследования с поверхности в настоящее время используются для сравнительной оценки водовмещающих свойств различных участков пород. Этого вполне достаточно для ориентировочного районирования территории и сравнения вариантов заложения скважин. Предпосылки для получения таких оценок в каждом отдельном случае могут проявляться в различной степени, однако можно выделить несколько общих приемов для различных типов трещиноватых пород.

Электроразведка

В основании использования метода ВЭЗ для оценки степени трещиноватости лежит зависимость измеряемого удельного электрического сопротивления руд от соотношения объемных проводимостей блоковой части породы и заполнителя трещин.

Для перехода к количественным оценкам степени трещиноватости по данным ВЭЗ к изучаемому объекту предъявляются дополнительные требования сохранения постоянства литолого-петрографического состава первичнооднородной породы, минерального состава (или концентрации) заполнителя трещин, структуры трещиноватого пространства. При этом необходимо использовать один и тот же способ измерения сопротивления, а также сохранить ориентировку измерительных установок относительно направления трещиноватости пород. При таких ограничениях в ряде случаев удается установить корреляционные зависимости между сопротивлением породы и ее водовмещающими свойствами, выраженными в виде коэффициента трещиноватости или единичного удельного водопритока, равного отношению удельного дебита к мощности водоносного горизонта, вскрытого скважиной. Для сравнительной характеристики аномальных участков по водообильности может использоваться также величина суммарной продольной электропроводности, равная отношению мощности водоносного горизонта к его сопротивлению, определяемым по данным ВЭЗ.

При постоянстве структуры трещиноватости скальных пород сравнительная оценка водоносных трещиноватых зон по степени трещиноватости может быть произведена по данным кру-

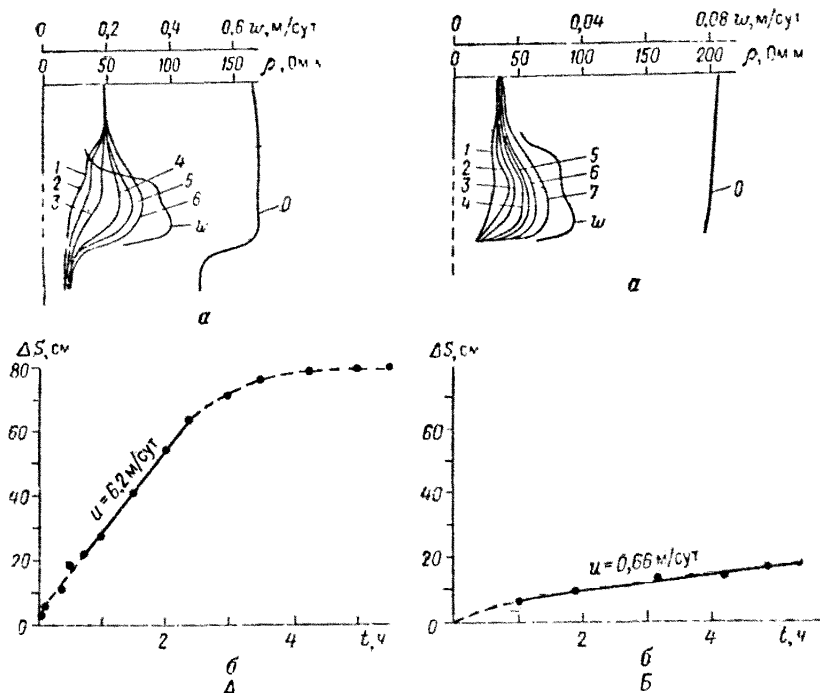


Рис. 8. Пример оценки коэффициента трещиноватости водовмещающих пород ($k_T = \omega(u)$) по данным МЗТ и резистивиметрии.

А — цикл наблюдений 25–31 октября 1968 г., $k_T = 0,06$; Б — цикл наблюдений 28–30 марта 1969 г., $k_T = 0,06$; а — графики резистивиметрии; б — графики продвижения фронта электролита ΔS по направлению потока в исследованиях по методу заряженного тела. ω — скорость фильтрации, u — действительная скорость потока

говых ВЭЗ или разнонаправленного профилирования. В первом случае в качестве критерия сравнения используется величина эллиптичности полярных диаграмм сопротивления, равная отношению большой оси эллипса к малой [52], а во втором — коэффициента вариации. Необходимо подчеркнуть, что подобный подход справедлив при оценке зон трещиноватости, имеющих достаточно большую видимую мощность, причем оценка распространяется только на системы крутопадающих трещин.

Необходимо назвать еще одну возможность количественной оценки степени трещиноватости пород. Такая возможность может быть реализована при условии, если есть скважина, вскрывающая оцениваемый водоносный горизонт. В этой скважине производятся исследования методами резистивиметрии [22, 53] и заряженного тела (МЗТ) ¹.

¹ Более подробно метод рассматривается в следующем разделе.

В результате интерпретации данных резистивиметрии и МЗТ соответственно определяется скорость фильтрации и действительная скорость подземного потока¹. Их отношение дает величину коэффициента трещиноватости. При этом предполагается, что основными водопроводящими каналами являются трещины и каверны. На рис. 8 приведен пример таких расчетов для одного из объектов в пределах Балтийского щита. Исследования были проведены в разное время (в период подъема уровней и в межень). Скорости фильтрации и действительные скорости изменились практически на порядок, а их отношение, соответствующее структуре водопроводящей среды, осталось, как и должно быть, постоянным.

Сейсморазведка

К числу наиболее достоверных методов оценки трещиноватости пород, видимо, должен быть отнесен метод сейсморазведки. Зависимость между степенью трещиноватости пород и скоростями упругих колебаний, а также показателями затухания — доказана. Тем не менее при практической реализации задача требует некоторых дополнительных приемов. В основе расчета коэффициента трещиноватости $k_{тр}$ лежит формула, полученная из уравнения среднего времени,

$$k_{тр} = \frac{v_3 (v_t - v_{t+3})}{v_{t+3} (v_t - v_3)}, \quad (1.3)$$

где v_{t+3} , v_t , v_3 — скорости продольных волн в трещиноватой породе, в твердой фазе породы и в заполнителе трещин соответственно.

Чтобы воспользоваться этой расчетной формулой, необходимо тем или иным путем оценить значения v_t и v_3 . Первые обычно определяются путем ультразвукового просвечивания монолитных образцов породы, характеризующихся достаточно большими величинами скорости распространения упругих колебаний и не обнаруживающих анизотропии в распределении скоростей. Скорость v_3 , если трещины заполнены водой, для ориентировочных расчетов берется равной 1500 м/с².

Расчет $k_{тр}$ по формуле (1.3) является приближенным, однако вполне достаточным для проведения сравнительного анализа выделенных трещиноватых участков.

¹ Возможность использования метода резистивиметрии ограничивается случаями вскрытия скважиной одной зоны трещиноватости или нескольких зон, но при условии, что по стволу скважины не происходит вертикальных перетоков воды из одних трещиноватых участков в другие.

² Некоторые авторы [44] используют величину v_3 , в 1,5—2 раза меньшую истинной.

Определение характера заполнителя трещин и карстовых полостей

При оценке перспектив выделенных зон трещиноватости и закарстованности пород решающее значение имеет вопрос о природе заполнителя пустотного пространства: вода или тонкодисперсный твердый материал. Все рассмотренные исследования, выполненные с целью локализации трещиноватых и закарстованных зон, не дают однозначного ответа на этот вопрос. В отдельных конкретных условиях могут, правда, существовать критерии для разделения зон с твердым и жидким заполнителем. Например, на площади Балтийского щита встречаются зоны трещиноватости, в составе заполнителя которых присутствуют сульфидные минералы (пирротин). Такие зоны оказываются маловодоносными. Зоны, в которых не отмечен привнос магнитных минералов, как правило, представлены чистыми трещиноватыми разностями кристаллических пород с хорошей водоотдачей и используются как источники водоснабжения. И те и другие зоны практически одинаково отмечаются по данным электро- и сейсморазведки. Лишь наличие магнитных аномалий позволяет надежно их разделить.

В качестве примера рассмотрим рис. 9, где на основании результатов различных геофизических методов и знаний о генетических особенностях зон развития тектонической трещиноватости решен вопрос о разделении участков с открытой и закрытой трещиноватостью. Исследования проведены в пределах Балтийского щита.

По данным ВЭЗ в кристаллическом массиве выделена мощная зона пониженного сопротивления (рис. 9, *г*). В ее пределах двухсторонним дипольным электропрофилированием на двух разносах отмечены две оси проводимости (рис. 9, *а*), соответствующие двум почти вертикально залегающим маломощным проводящим зонам второго порядка. Эти зоны отмечены положительными аномалиями магнитного поля $Z_a > 200$ гамм (рис. 9, *б*) и пониженными значениями граничных скоростей (рис. 9, *в*). Однако мощность ее несколько меньше, причем не совпадают западные границы. Характерно также, что одна из маломощных проводящих зон, подтвержденная магнитной аномалией, также лежит за пределами зоны пониженных граничных скоростей.

По наличию магнитных аномалий зоны высокой проводимости характеризуются привносом рудных минералов в результате процессов, сопровождавших тектонические явления. Тот факт, что западная зона отмечена также высокими граничными скоростями, указывает, что первичные трещины достаточно полно заполнены вторичными минералами. Развитие вторичной минерализации, обогащенной рудными минералами, в районе Балтийского щита встречается часто.

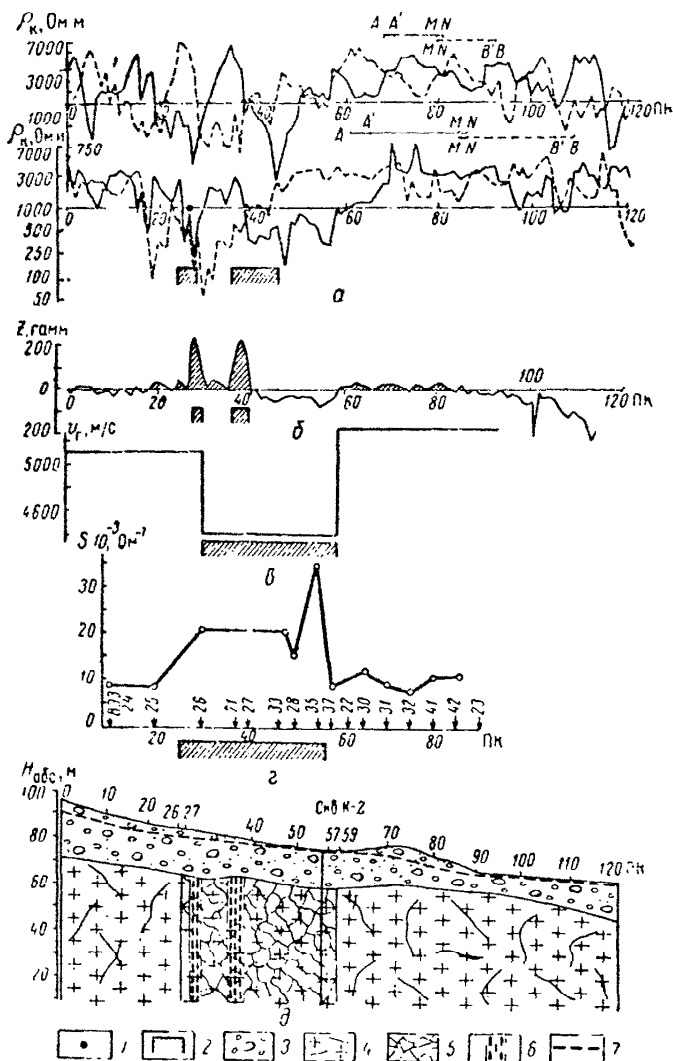


Рис. 9. Пример выделения перспективного участка в пределах трещиноватой зоны (Бадтийский щит).

а — графики дипольного электропрофилирования; б — график Z_a ; в — график граничной скорости преломленных волн; г — график продольной электрической проводимости S водонесущих пород до глубины 50 м (по данным ВЭЗ); д — геологический разрез.

1 — горизонтальная проекция оси проводимости дипольного электропрофилирования; 2 — аномальные зоны, выявленные различными геофизическими методами; 3 — разнотечные четвертичные отложения; 4 — кристаллические породы; 5 — зона разлома; 6 — сульфидная минерализация (предположительно пирротиновая); 7 — уровень подземных вод (по данным бурения и ВЭЗ).

Указанные факты позволили определить общие границы открытой трещиноватости в соответствии с данными сейсморазведки. Скв. К-2, пройденная у восточной границы трещиноватой зоны, вскрыла в кристаллических породах подземные воды с дебитом 670 м³/сут.

Этот же пример может быть приведен как иллюстрация необходимости комплексирования геофизических методов, изучающих различные природные явления, в связи с неоднозначностью решения задачи одной электроразведкой.

Некоторые перспективы объективного разделения трещиноватых зон, заполненных обломочным материалом или водой, в последнее время связываются с анализом данных сейсморазведки. Соответствующие критерии были указаны в разделе «Картинирование зон повышенной водоносности, связанной с трещиноватостью и карстом». К решению данного вопроса могут быть привлечены исследования по методу естественного потенциала. Основываясь на теории фильтрационного происхождения естественного электрического поля, можно предположить, что наблюдаемые аномалии служат объективным индикатором обводненных зон. В реальных условиях, однако, такая прямолинейность суждения не может быть признана бесспорной. Поэтому план аномалий ЕП в абсолютных значениях потенциала или в показателях эллиптичности полярных диаграмм дополнительно должен быть сопоставлен с планом гидроизогипс, если он имеется, или проанализирован в сезонном цикле в период наибольших колебаний уровня подземных вод.

Необходимо указать, что решение вопроса о характере заполнителя трещин и карста — пока наименее разработанная область приложения геофизических данных.

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЯ ПИТАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Эксплуатационные запасы подземных вод или величина водопритоков в горные выработки принципиально отличаются от запасов всех других полезных ископаемых тем, что характеризуются непрерывным восполнением в процессе отбора. Условия, интенсивность и источник восполнения зависят не столько от свойств эксплуатируемого горизонта, сколько от его контакта с окружающей средой.

В связи с этим перед геофизическими исследованиями ставятся задачи, направленные на изучение: условий взаимосвязи подземных вод трещинного или трещинно-карстового горизонта с водами перекрывающих рыхлых отложений; условий взаимосвязи подземных вод трещинного или трещинно-карстового горизонта с поверхностными источниками; направления и скорости подземных вод в пределах эксплуатируемого горизонта.

Изучение условий взаимосвязи подземных трещинных и трещинно-карстовых вод с водами перекрывающих отложений

Формулировка данной задачи предполагает, что в этих исследованиях интерес представляют прежде всего условия залегания и состав перекрывающих отложений. Исходным материалом для интерпретации служат в основном результаты ВЭЗ и профилирования, причем требования к результатам ВЭЗ выше, чем при решении предыдущих задач. В частности, эти исследования требуют более густой сети наблюдений. Они носят площадной характер и концентрируются в границах зон, по которым осуществляется оценка эксплуатационных запасов подземных вод или прогноз водопритока в горные выработки, и производятся с большей детальностью в пределах разреза перекрывающих отложений. Для этого зачастую приходится отступать от рекомендованных инструкцией разносов линии АВ, увеличивая число замеров в левой части кривой зондирования. Одновременно максимальные разносы могут быть уменьшены.

По данным ВЭЗ приемами, изложенными в геофизической литературе [59], определяют слоистость разреза перекрывающих отложений и оценивают литологический состав каждого слоя, руководствуясь закономерным изменением его сопротивления в зависимости от гранулометрического состава: с увеличением зернистости пород их сопротивление растет. Особое значение при интерпретации имеет анализ типов кривых ВЭЗ. Полученные карты и разрезы литологического состава перекрывающих отложений служат конечным материалом для качественного суждения об условиях возможной взаимосвязи вод сравниваемых водоносных горизонтов.

Выделение возможных гидрогеологических окон и местных водоупоров позволяет в дальнейшем более целенаправленно осуществлять опытно-фильтрационные исследования для установления взаимосвязи трещинных и поровых вод в рассматриваемой двухслойной гидродинамической схеме.

Изучение условий взаимосвязи подземных трещинных и трещинно-карстовых вод с поверхностными источниками

Характеристика условий взаимосвязи оцениваемого водоносного горизонта с атмосферными осадками и поверхностными источниками на основании геофизических исследований позволяет выявить роль ряда важных факторов, влияющих на баланс подземного стока, таких как области интенсивного питания водоносного горизонта за счет инфильтрации атмосферных осадков или поверхностного стока, очаги разгрузки подземных вод под наносами или на дне водоемов.

На основании использования геофизических методов можно осуществить прогноз, а также оценку величины инфильтрационного питания через зону аэрации путем определения ее мощно-

сти и состава. Соответствующие данные достаточно надежно получаются в результате электроразведки методом ВЭЗ и сейсморазведки методом КМПВ.

Электроразведка

При исследовании методом ВЭЗ (как и при решении предыдущей задачи) увеличивается количество разносов линии АВ на начальной ветви кривой зондирования. Граница между водонасыщенными и сухими одноименными породами является достаточно резкой геоэлектрической границей, что способствует ее выделению на кривых ВЭЗ. Количественная интерпретация производится по палеткам [59]. В некоторых районах применяется эмпирический способ определения глубины до уровня грунтовых вод [44], позволяющий сокра-

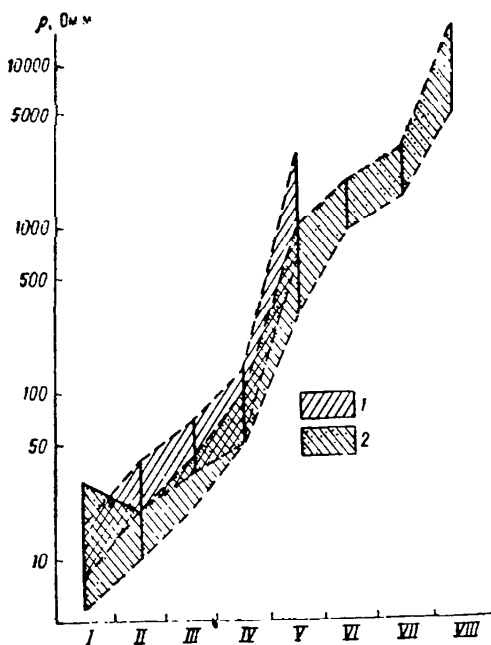


Рис. 10. Зависимость удельного электрического сопротивления от литологического состава пород зоны аэрации для Средней Азии.

I — глина; II — суглинок; III — супесь; IV — песок пылеватый; V — песок разнородный; гравийно-галечниковые отложения. VI — мелкие VII — средние; VIII — крупные. 1 — сухие отложения, 2 — влажные отложения.

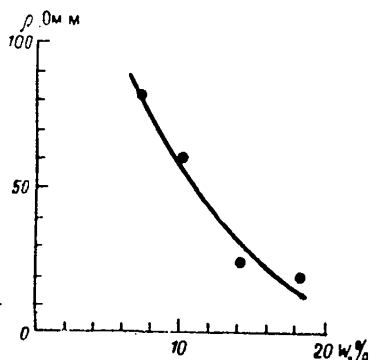


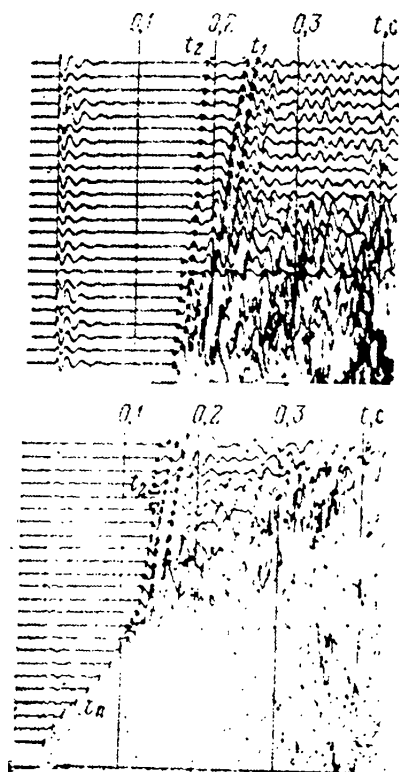
Рис. 11. Зависимость удельного электрического сопротивления суглинков от их влажности W.

тить число вычислительных операций. Однако мощность зоны аэрации по данным ВЭЗ достаточно уверенно может быть оценена только в песчано-глинистых и гравийно-галечниковых разрезах, где сопротивление сухих и водонасыщенных пород отличается в 3—10 раз. Литологическая оценка пород зоны аэрации

по данным ВЭЗ, так же как и зоны полного водонасыщения, производится по эмпирическим зависимостям удельного электрического сопротивления от гранулометрического состава рыхлых образований [24, 32, 70]. На рис. 10 приведена одна из таких зависимостей для аридных областей Средней Азии.

В связи с тем, что сопротивление однотипных пород меняется в значительном диапазоне и дополнительно зависит от влажности, литологическая оценка пород по данным ВЭЗ является приближенной. В то же время при известном литологическом строении зоны аэрации зависимость сопротивления от влажности дает возможность получить ориентировочную оценку ее величины для использования в расчетах инфильтрационного питания через зону аэрации [71]. На рис. 11 приведена такая эмпирическая зависимость для суглинков.

Сейсморазведка



Определение мощности зоны аэрации, представленной рыхлыми породами, по данным сейсморазведки основано на том, что граница полного водонасыщения является сильной преломляющей границей для продольных волн. Дифференциация в скоростях продольных волн между водонасыщенными и неводонасыщенными рыхлыми породами зависит также от литологического состава, плотности и глубины залегания их, однако отношение скоростей продольных волн в неводонасыщенных породах к скоростям в полностью водонасыщенных остается менее 0,7 [37, 38]. В то же время скорость поперечных волн практически не зависит от степени водонасыщения пород и поэтому уровень грунтовых вод не фиксируется поперечными волнами. Таким образом, гра-

Рис. 12. Характер записи волн, связанных с уровнем грунтовых вод t_1 , скальным водоупором t_2 и рыхлыми неводонасыщенными породами зоны аэрации t_3

нища полного водонасыщения является сейсмической границей особого рода и при совместном использовании продольных и поперечных волн может быть достаточно уверенно установлена.

Благоприятным условием применения сейсморазведки для определения глубины до уровня грунтовых вод является достаточная выдержанность преломляющего горизонта.

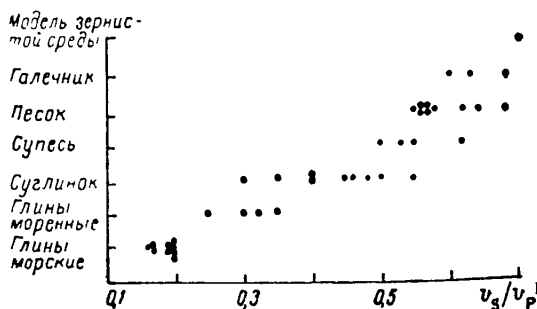


Рис. 13. Зависимость отношения скоростей поперечных v_p и продольных v_s волн от литологического состава рыхлых пород зоны аэрации

На рис. 12 в качестве примера приведены сейсмограммы, снятые на двух пикетах, с выделенными волнами, соответствующими различным сейсмическим границам, в том числе уровню грунтовых вод, залегающему в рыхлых породах.

Литологическая оценка рыхлых пород зоны аэрации также возможна при совместном анализе продольных и поперечных волн, что требует использования соответствующей методики измерений. Пользуясь экспериментальными зависимостями, подобными приведенным на рис. 13, по величине отношения скорости поперечной волны к продольной судят о литологическом составе соответствующего слоя [20].

Из перечисленных методов, применяемых для оценки строения зоны аэрации и величины инфильтрационного питания, сейсмический метод оказывается более трудоемким. Поэтому, если требуется только приближенная оценка, его не применяют. При необходимости более детального расчета совместное использование электроразведки и сейсморазведки обязательно. В зависимости от размеров оцениваемой площади и сложности строения ее такие комплексные исследования проводятся по сети профилей или по выборочным маршрутам. При всех методах и методиках исследования необходимы опорные горные выработки для получения эмпирических зависимостей сопротивления и скоростей от гранулометрического состава пород.

Часто питание или разгрузка трещинных и трещинно-карстовых вод осуществляется в виде концентрированных очагов. В ряде случаев очаги доступны для визуального наблюдения, в дру-

гих — они скрыты под наносами или в руслах рек и озер. Выявление таких мест представляет несомненный интерес как для балансовых оценок в ненарушенных условиях или в условиях подтопления, так и для оценки защищенности подземных вод от загрязнения сбросами или шахтным водоотливом.

Выше упоминалось, что интенсивная локализованная фильтрация может быть выявлена по данным съемки естественных потенциалов. Наибольшими значениями потенциалов отмечаются места непрерывной восходящей или нисходящей фильтрации подземных вод трещинного или трещинно-карстового горизонта. Причем, что очень важно, аномалии над зонами разгрузки и питания имеют противоположные знаки. Разгрузка отмечается положительными аномалиями, питание — отрицательными. Особая ценность метода ЕП заключается в возможности достаточно быстро осуществить съемку дна водоемов и не только установить очаги питания или дренирования подземных вод, но и оценить их изменение в сезонном цикле, если есть основание предполагать изменчивость условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод [58]. Необходимо указать также на возможность выявления очагов разгрузки подземных вод на дне водоемов при использовании резистивиметровых измерений в придонном слое.

Рыхлые наносы над коренными породами являются аккумуляторами атмосферных осадков, которые постепенно просачиваются в отдельные трещины и карстовые полости. При разгрузке подземных вод происходит обратная картина. В обоих случаях такие области часто не могут непосредственно наблюдаться с поверхности. Для их выявления и установления направления потока (питание или разгрузка) может быть привлечена площадная съемка естественных потенциалов. Результативным материалом является карта, построенная в изолиниях. Места увеличения значений потенциалов и градиентов их изменения будут, видимо, отвечать местам интенсивного взаимодействия атмосферных вод, аккумулярованных в наносах, с водами коренных пород.

Изучение направления и скорости движения подземных вод

Направление и скорость подземных вод обуславливаются, кроме прочих факторов, сложившимися градиентами давления в данном конкретном сечении фильтрационного потока. В связи с эксплуатацией подземных вод, развитием горных работ или подтоплением эти характеристики потока могут измениться. Соответственно в ряде случаев может возникнуть необходимость заранее предусмотреть возможные последствия нарушения режима, либо изменить схему расположения каптажных сооружений.

Геофизические исследования могут дать объективные данные об указанных характеристиках потока. Частично они могут быть получены в результате исследований по методу естественных потенциалов и косвенно — другими методами. Однако наиболее объективные данные могут быть получены в результате работ по методу заряженного тела.

Направление потока подземных вод определяется по полярным диаграммам электрического потенциала, полученным в различные моменты времени после ввода электролита в скважину. Скорость смещения эллиптических диаграмм в этом направлении принимается равной скорости потока [42]. Определение этих характеристик, особенно направления фильтрации в сложных гидрогеологических условиях, иногда оказывается очень важным.

В качестве примера можно привести опыт разведки Александровско-Невского месторождения подземных вод в Иркутской области. Месторождение подземных вод приурочено к трещиноватым песчаникам ордовика.

Данными площадной электроразведки и результатами опытно-фильтрационных работ на опытном двухлучевом кусте была установлена резко выраженная линейная анизотропия трещиноватости пород и фильтрационных свойств с лучшими характеристиками (примерно на порядок) вдоль долины. Зона трещиноватости представлена системой узколокализованных линейно вытянутых трещиноватых зон второго порядка (см. ниже). На основании анализа плана гидроизогипс и результатов работ по методу МЗТ установлено, что подземный поток при естественных градиентах давления разгружается в долину речки Алки в виде мощного родника. При проведении работ по методу МЗТ в процессе опытно-эксплуатационной откачки было установлено, что направление подземного потока совпадает с направлением трещиноватости. На этом основании была дана рекомендация о целесообразном расположении ряда эксплуатационных скважин перпендикулярно долине реки с заложением их в различных трещиноватых зонах, что должно обеспечивать более эффективный перехват подземного потока и наименьшие срезки уровня во взаимодействующих скважинах в условиях эксплуатации.

Как указывалось, метод МЗТ может быть применен для исследования потока подземных вод в естественном и нарушенном режиме. Это дает возможность при необходимости контролировать распределение притоков в горные выработки по мере продвижения горных работ в сложных гидрогеологических условиях.

Часть вторая

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ И ЗАДАЧИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКВАЖИНАХ

Привлечение методов каротажа, позволяющих изучать свойства и состояние пород, а также реакцию их на приложенное гидродинамическое возбуждение, обеспечивает дополнительную и иногда более достоверную информацию по существу рассматриваемой в данной работе проблемы в сравнении с информацией, извлекаемой в результате изучения керна или проведения зональных фильтрационных испытаний разрезом. Отдельные вопросы разрешаются с помощью каротажа с меньшими затратами времени. Применение его дает возможность изучать изменчивость емкостных и фильтрационных свойств пород в вертикальном разрезе и в плане, основываясь не только на прямых, но и косвенных признаках указанных свойств. Очень важно, что носитель геофизической информации (диаграммы) позволяет делать это с детальностью, значительно более высокой, чем все другие методы гидрогеологических исследований разрезов скважин.

При оценке возможности различных методов каротажа и их комплексов при изучении гидрогеологических характеристик трещиноватых пород необходим учет не только природных факторов, характерных для данного месторождения, но и технологических условий проведения измерений.

В общем случае все методы каротажа гидрогеологических скважин можно разделить на три группы в зависимости от характера изучаемых явлений и процессов, обуславливающих предпосылки для изучения искомых гидрогеологических показателей пород.

1. Методы, изучающие различие горных пород по значениям физических свойств. Изменение структуры и состояния скелета горной породы является одним из наиболее существенных факторов, определяющих значения физических свойств пород и их изменение.

К этой группе относятся методы: электрокаротаж по методу сопротивления; гамма-каротаж; гамма-гамма-каротаж; нейтронный гамма-каротаж; акустический каротаж; фотокаротаж.

2. Методы, изучающие физико-химическое взаимодействие бурового раствора и горных пород.

В результате вытеснения поровых вод фильтратом бурового раствора в околоскважинной зоне пород-коллекторов образуется цилиндрический слой, имеющий электропроводность, отличную от электропроводности ненарушенной породы. На контакте бурового раствора с породой, насыщенной раствором иной концентрации и химического состава, могут происходить диффузионно-адсорбционные процессы, способствующие образованию диффузионно-адсорбционных потенциалов.

К этой группе относятся методы: микрозондирование; двух растворов в варианте сопротивления; естественных потенциалов; двух растворов в варианте естественных потенциалов; изотопов.

3. Методы, изучающие фильтрационные процессы в скважине.

Методы этой группы изучают как естественную фильтрацию подземных вод, так и фильтрацию в условиях гидравлического возбуждения водоносных горизонтов, ускоряющего и усиливающего ее.

В эту группу входят методы: резистивиметрия; расходометрия.

Приведенная классификация охватывает основные методические варианты применения геофизических исследований скважин. Она учитывает возможности изучения природных распределений физических свойств пород, если они подверглись процессам, приведшим к нарушению их сплошности и монолитности, а также явлений, возникающих в результате взаимодействия пород-коллекторов с буровой жидкостью и скважиной.

Используя соответствующее отображение трещиноватости и сопутствующей ей водоносности пород в наблюдаемых при каротаже показаниях, можно сделать вывод: о местоположении в разрезе трещиноватых и обводненных интервалов горных пород; об интенсивности развития трещиноватости в горных породах; о фильтрационных свойствах трещиноватых пород; о распределении гидравлических напоров и характере связи различных водоносных горизонтов.

Необходимо, однако, иметь в виду, что показания многих методов каротажа неоднозначно связаны с трещиноватостью. Это обуславливает целесообразность комплексирования нескольких методов, а также предварительного согласования их показаний с данными анализа керна и других объективных методов, если они имеются. В противном случае достигаемый по данным каротажа результат может считаться достоверным в пределах справедливости априорных предположений о существовании закономерных связей между геофизическими показаниями и свойствами пород. По этой причине данные каротажа в большей

мере используются для сравнительной характеристики различных интервалов разреза, чем для оценки абсолютных величин трещиноватости и проницаемости пород.

Совместный анализ данных каротажа различных скважин в конкретных геолого-гидрогеологических условиях позволяет изучать: закономерности развития трещиноватости и изменения фильтрационных свойств пород в вертикальном разрезе и в плане; характер циркуляции подземных вод в горных породах; условия формирования естественных ресурсов подземных вод и возможности их привлечения при эксплуатации и т. п.

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 1972 г. были изданы методические рекомендации по каротажу гидрогеологических скважин, в которых достаточно подробно рассмотрены общие принципы и основные технологические особенности применяемых и перспективных методов [43]. В связи с этим в данной работе приводятся только краткие формулировки положений, лежащих в основе методов каротажа, представляющих интерес для изучения гидрогеологических характеристик разрезов трещиноватых пород.

Электрокаротаж по методу сопротивлений

Физической основой электрокаротажа по методу сопротивлений является различие горных пород по электропроводности в связи с различием литолого-петрографического состава, структурных особенностей и минерализации насыщающей воды. Измерение сопротивлений в скважинах осуществляется с помощью специальных зондов, различающихся размерами и соответственно объемом изучаемого заскважинного пространства, конструкциями, обеспечивающими учет особенностей скважинных условий измерения и строения изучаемой среды, а также способом задания электрического поля (постоянное или переменное).

Исследования по методу сопротивлений могут выполняться в модификациях, различающихся технологическими особенностями проведения измерений. При этом в принципе не важно, на какой инструментальной основе эти измерения осуществляются. Среди таких технологических модификаций электрокаротажа сопротивлений необходимо назвать следующие методы.

Метод кажущегося сопротивления стандартным зондом (КС). Он предусматривает разовую регистрацию кажущегося сопротивления. При этом безразлично, осуществляются ли измерения стандартными градиент- или потенциал-зондом или установкой бокового каротажа. Однако важно, чтобы в результате этих разовых измерений достигалось наилучшее приближение к действительному распределению пород по сопротивлениям.

Боковое каротажное зондирование (БКЗ). По своим задачам этот метод совпадает с предыдущим. Различие состоит лишь в необходимости многократной регистрации сопротивления зондами различного радиуса действия для получения зависимости $\rho_k = f(AO)$, позволяющей исключить из результатов измерения влияние скважины и прискважинных эффектов и оценить истинное значение сопротивления породы. В благоприятных случаях дополнительно могут быть выяснены характеристики прискважинной зоны.

Метод микрозондирования (МЗ). В основе применения метода лежит изучение электрических параметров прискважинной зоны, образующейся в результате бурения. Использование установок различного радиуса действия дает информацию о наличии в разрезе зон проникновения фильтрата бурового раствора и о свойствах этих зон. Измерения осуществляются специальными микрозондами (при неглубоком проникновении) или зондами разной глубинности из комплекта БКЗ.

Метод электрокаротажа двух растворов. Этот метод, как и предыдущий, изучает проникновение раствора в проницаемые породы. Однако он отличается тем, что основан на сопоставлении двух или более кривых сопротивлений, полученных установкой одного радиуса действия при принудительном изменении свойств бурового раствора и зоны проникновения. Это достигается либо изменением электрического сопротивления бурового раствора, либо изменением забойного давления, либо того и другого одновременно. Соответственно регистрация производится до и после изменения параметров. Такие же исследования могут производиться во временном цикле в связи с изменением параметров зоны проникновения после бурения, вызванного диффузионным и фильтрационным взаимодействием раствора с подземными водами.

Метод естественных потенциалов

При помощи метода естественных потенциалов (ПС) изучается характер распределения электрических потенциалов собственной поляризации по оси скважины, являющихся результатом диффузионных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов. Благоприятными условиями использования этого метода в рассматриваемой проблеме являются случаи бурения скважин с глинистой промывкой. Среди модификаций метода предпочтительными являются повторные измерения при изменении свойств глинистого раствора с целью интенсификации диффузионно-адсорбционных процессов в скважине.

Гамма-каротаж

Метод гамма-каротажа (ГК) основан на различии горных пород по интенсивности естественного гамма-излучения и ис-

пользуется для литолого-петрографического расчленения разрезов скважин. В рассматриваемой проблеме эти вопросы имеют второстепенное значение. Поэтому данные гамма-каротажа используются как вспомогательные при обработке данных других методов радиометрических исследований. Большое значение имеет модификация гамма-каротажа, использующая активацию бурового раствора радиоактивными веществами с продавливанием его в проницаемые интервалы путем повышения забойного давления. В этом случае целью измерения становится выявление интервалов в разрезе, оказавшихся наиболее зараженными. Возможно также проводить исследования, прибегая к активации пород после завершения бурения. В этом случае регистрация кривой гамма-каротажа производится до и после активации.

Гамма-гамма-каротаж

В основе использования метода гамма-гамма-каротажа (ГГК) лежит различие горных пород по плотности в связи с различным литолого-петрографическим составом и структурой, отражающихся на распределении интенсивности рассеянного гамма-излучения. Метод ГГК относится к малоглубинным (по радиусу), причем глубинность уменьшается с увеличением плотности пород. Поэтому изменения в прискважинной зоне являются помехой, и тем большей, чем плотнее порода. Отсюда наиболее подходящими условиями применения ГГК являются разрезы сцементированных терригенных и карбонатных пород, вскрытых скважиной с промывкой забоя чистой водой. Наличие каверн на стенках скважины является серьезной помехой применению метода ГГК.

Нейтронный гамма-каротаж

Нейтронный гамма-каротаж (НГК) основан на регистрации вторичного гамма-излучения, интенсивность которого находится в обратном соотношении с общим водородосодержанием пород, принимаемом в данных исследованиях за аналог общего водосодержания. Метод НГК также относится к малоглубинным, поэтому изменения в прискважинной зоне являются существенной помехой, требующей специального учета.

Наиболее благоприятными условиями применения НГК являются разрезы трещиноватых пород с общей пористостью до 15—20%.

Акустический каротаж

В основе применения метода акустического каротажа (АК) в рассматриваемой проблеме лежит достаточно строгая зависи-

мость между скоростью прохождения упругих колебаний и структурным состоянием пород. В скважине измерения этой характеристики производятся установкой, содержащей излучатель и два приемника упругих колебаний, расположенные на фиксированном расстоянии друг от друга и от излучателя.

Резистивиметрический каротаж

В основе резистивиметрического каротажа (РК) лежит зависимость между скоростью изменения концентрации солевого раствора, заполняющего скважину с проницаемыми стенками, и скоростью фильтрации подземных вод.

В практике исследования концентрация раствора в скважине измеряется электрическим способом, основанным на использовании пропорциональности ее величины удельной электропроводности. Измерения производятся во временном цикле, что позволяет установить закономерность изменения концентрации раствора и по этим данным судить о гидрогеологическом строении разреза и скорости фильтрации подземных вод на различных глубинах.

Использование резистивиметрического каротажа для указанной цели предполагает, что в каждом элементарном слое разреза фильтрационный поток имеет общий и равный для всех слоев гидростатический напор, что исключает возможность внутрискважинных вертикальных перетоков воды. В практике исследования разрезов трещиноватых пород это условие соблюдается относительно редко. Поэтому при наличии перетоков возможности метода сводятся к установлению мест притока воды в скважину и мест ее ухода из скважины.

Расходометрический каротаж

Как метод исследования гидрогеологических скважин расходометрический каротаж (РМ) использует непосредственную реакцию водопроницаемых пород на приложенное к ним гидродинамическое возбуждение. В зависимости от знака градиента давления на границе скважина—порода вода поступает в скважину или, наоборот, из скважины в окружающие породы. В зависимости от гидродинамического режима возбуждения различают две основные модификации расходометрического каротажа: расходометрический каротаж при установившемся возбуждении и при неустановившемся возбуждении.

Собственно расходометрические измерения заключаются в регистрации с помощью дистанционного расходомера распределения объемного расхода потока воды по стволу скважины. Измерения производятся до возбуждения скважины, т. е. при установившемся уровне гидродинамического равновесия напоров, соответствующих различным водоносным зонам в разрезе,

и на стадии возбуждения скважины в одном из указанных режимов.

Между величинами зарегистрированных водопритокów или водопоглощений и фильтрационными свойствами соответствующих интервалов разреза существует достаточно строгая связь, что позволяет произвести объективную оценку фильтрационных свойств.

Гидродинамическое возбуждение захватывает периферийные области на значительном расстоянии от скважины. Это явление используется модификацией расходометрического каротажа реагирующих скважин, расположенных в области влияния возмущающей скважины. В этой модификации расходометрического каротажа изучается распределение объемного расхода воды по стволу реагирующей скважины до возбуждения и в процессе возбуждения возмущающей скважины на стадии квазистационарного режима фильтрации на одно или несколько понижений. В результате анализа полученного материала может быть дана оценка величины срезки от статического уровня каждого из взаимодействующих водоносных горизонтов, которая позволяет дать характеристику фильтрационной связи водоносных горизонтов с возмущающей скважиной. В условиях локальной обводненности разреза по вертикали и в плане, свойственной многим районам развития трещинных и трещинно-карстовых вод, этот вопрос может представлять интерес в связи с изучением условий циркуляции подземных вод в естественном и нарушенном режиме, определением условий формирования водопритока к водозаборным сооружениям и возможности восполнения эксплуатационных запасов за счет ниже- и вышележащих горизонтов.

Количественная интерпретация данных расходометрического каротажа реагирующих скважин основывается на сравнении индикаторных диаграмм дебит водоносного горизонта — динамический уровень в скважине, полученных при исследовании данной скважины как возмущающей и как реагирующей. При несоблюдении указанной последовательности и полноты исследования, что часто имеет место на практике, оказывается возможным судить о степени фильтрационной связи водоносных горизонтов только качественно.

Другие методы каротажа

Термокаротаж. Термокаротаж (ТК) в скважинах может осуществляться в различных модификациях. В настоящей работе указывается на возможность использования лишь одной, предусматривающей изучение распределения температур естественного теплового поля. Это распределение температур в разрезе отражает, кроме прочих факторов, условия циркуляции подземных вод и их взаимосвязь с поверхностным стоком. В свя-

зи с этим измерения осуществляются в скважинах с установившимся термальным режимом. Требования к чувствительности и точности этих работ также должны быть повышены.

Фотокаротаж. С помощью скважинных фотоаппаратов представляется возможным осуществить фотографирование стенок скважины на фотопленку. Фотоснимки являются объективным материалом для изучения структуры пород.

Кавернометрия. В основе использования данных кавернометрии (КМ) в рассматриваемой проблеме лежит предположение о том, что устойчивость стенок скважины связана со структурным состоянием пород. Таким образом, профиль ствола скважины может качественно характеризовать породы с различным нарушением сплошности. Кроме того, метод имеет вспомогательное значение при интерпретации данных других методов: ГГК, НГК, АК, РМ.

ВЫДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОВАТЫХ (ОБВОДНЕННЫХ) ЗОН В РАЗРЕЗЕ СКВАЖИН

Задача разграничения разреза скважины на интервалы трещиноватых и плотных пород может быть решена различными методами каротажа. Их удобно сгруппировать и рассмотреть в соответствии с приведенной выше классификацией методов.

Трещиноватость горных пород в общем случае может развиваться в результате различных процессов в абсолютно плотных породах или накладываться на первичную пористую матрицу, или осложняться последующими процессами выщелачивания и карстообразования. В результате развития пустотного пространства в плотных породах происходит изменение таких свойств, как электрическое сопротивление, плотность, водородонасыщенность (эквивалент водонасыщенности), упругость. Соответственно интерпретационными признаками интервалов с повышенной общей пустотностью являются: а) снижение значения электрического сопротивления; б) увеличение интенсивности ГГК; в) снижение интенсивности НГК; г) снижение скорости распространения упругих колебаний и уменьшение их относительных амплитуд.

При раздельном рассмотрении результатов различных методов каротажа необходимо учитывать следующие факторы.

В породах трещинного типа возможность возникновения ощутимых изменений регистрируемых геофизических параметров находится в тесной связи с густотой сети трещин на интервале, соответствующем разрешающей способности метода. На практике указанные интерпретационные признаки могут быть однозначно применены только для выявления мощных зон интенсивно развитой трещиноватости. Поэтому упомянутые геофизические данные могут быть использованы для общей характеристики толщи пород с точки зрения ее однородности как косвенного гидрогеологического показателя.

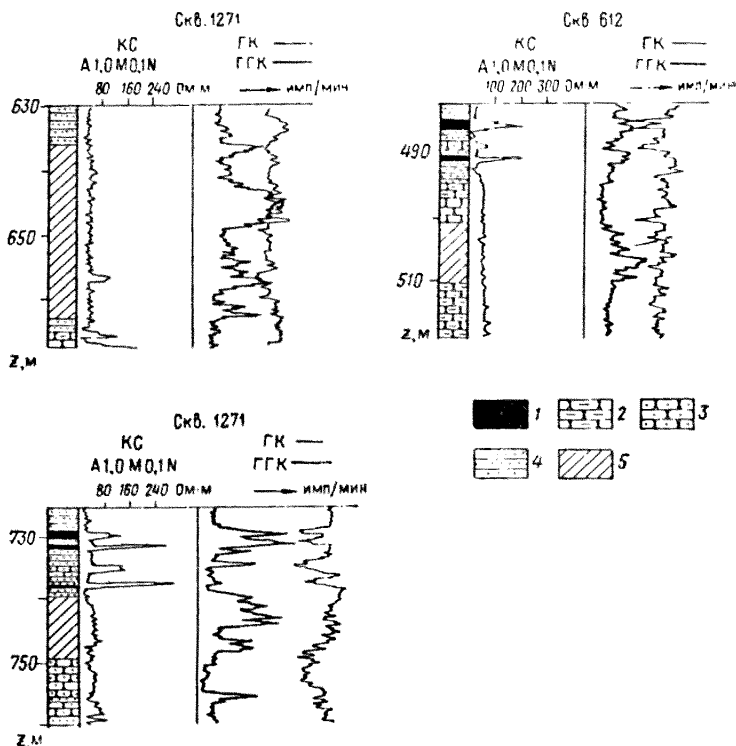


Рис. 14. Пример локализации разрушенных песчаников и алевролитов в зоне тектонического нарушения по данным комплекса КС, ГК, ГГК.

1 — уголь; 2 — глинистый песчаник; 3 — песчаник; 4 — алевролит; 5 — нарушенные породы

В породах порово-трещинного и трещинно-карстового типа указанные предпосылки проявляются более контрастно, что уменьшает вероятность пропуска соответствующих интервалов по данным каротажа. Однако разрезы таких пород характеризуются не только структурной, но и литологической неоднородностью. Это существенно усложняет задачу, что требует дополнительного привлечения данных гамма-каротажа и совместного рассмотрения показаний каждого метода.

На рис. 14 приведен пример локализации разрушенных алевролитов в зоне тектонического нарушения по данным комплекса КС, ГК, ГГК. Надо сказать, что на практике редко применяется указанный комплекс методов, поэтому естественные физические предпосылки выделения трещиноватых интервалов в разрезе скважин используются не полностью, а выполняемые исследования не обеспечивают однозначного решения задачи.

Скважины для гидрогеологических исследований в трещиноватых породах бурятся по возможности с промывкой забоя чи-

стой водой. Однако не редки случаи, когда по геолого-техническим причинам промывка забоя осуществляется глинистым раствором. В нормальных условиях бурения забойное давление превышает пластовое. Возникающий при этом градиент давления обеспечивает частичное поступление буровой жидкости в проницаемые породы. Этот фактор является чрезвычайно благоприятным для локализации водопроницаемых интервалов по данным каротажа. Поэтому важно заранее (при необходимости использования глинистого раствора при бурении) позаботиться о создании достаточного различия в значениях физических свойств бурового раствора и подземных вод (прежде всего по электрическому сопротивлению). Если это мероприятие не было предусмотрено заранее, оно может быть выполнено непосредственно перед каротажными измерениями.

Для уверенного выявления проницаемых интервалов пород весьма эффективны повторные геофизические исследования, осуществляемые при условии заполнения скважины жидкостью с различным сопротивлением, минерализацией или радиоактивностью. Такие исследования обычно производятся дважды: первый раз при заполнении скважины буровой жидкостью и второй — после дополнительной обработки жидкости.

Интерпретационными признаками интервалов с повышенной общей пустотностью в таких условиях являются: а) различие в показаниях микроградиент- и микропотенциал-зондов (при неглубоком проникновении раствора в окружающие породы); б) различие в показаниях стандартных градиент- и потенциал-зондов (при глубоком проникновении раствора в окружающие породы); в) различие в показаниях бокового каротажа при повторных измерениях сопротивления после смены раствора в скважине с одновременным повышением градиента давления на стенках скважины; г) аномалии ПС (по сравнению с уровнем ПС против заведомо плотных интервалов); д) увеличение или уменьшение аномалий ПС, вплоть до изменения знака при повторном измерении ПС после изменения минерализации раствора в скважине; е) повышенные аномалии интенсивности гамма-излучения (в случае предварительной активации бурового раствора); ж) различие в показаниях интенсивности гамма-излучения, зарегистрированных до и после активации раствора в скважине с учетом фона против заведомо плотных интервалов разреза.

Выявление всех указанных интерпретационных признаков одновременно не является обязательным. Хотя дублирование некоторых, особенно различных по физической природе, может служить критерием надежности. Методы, основанные на изучении указанных предпосылок, могут рассматриваться как методы непосредственной индикации проницаемых интервалов. Однако необходимо считаться с разрешающей способностью каждого из них.

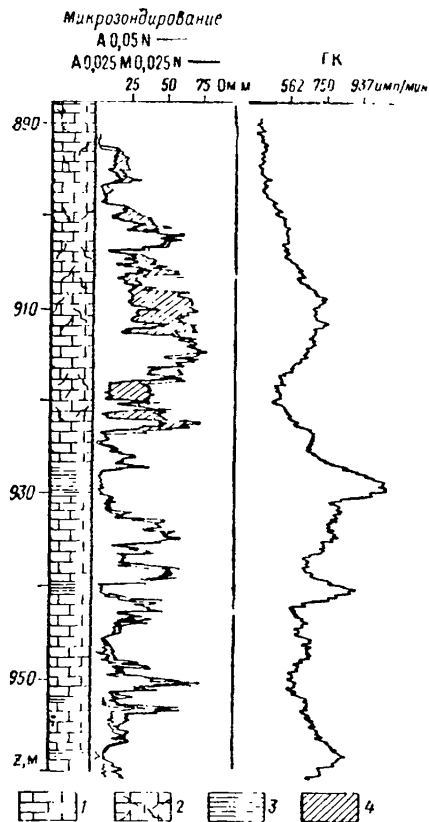


Рис. 15. Пример выделения интервалов повышенной проницаемости в пределах трещиноватой карбонатной толщи по данным микрозондирования (бурение с глинистым раствором). 1 — известняк плотный; 2 — известняк трещиноватый; 3 — глина сланцеватая; 4 — зоны повышенной проницаемости

Наиболее уверенно могут быть выявлены интервалы интенсивной трещиноватости в сцементированных терригенных или карбонатных породах.

На рис. 15 показан пример локализации интервалов повышенной проницаемости пород по данным микрозондирования в карбонатной толще. По описанию керна эта толща характеризуется развитой системой трещин. Так как бурение скважины производилось с промывкой забоя глинистым раствором, расхождение кривых микроградиент- и микропотенциал-зондов нужно связывать не только с проникновением фильтрата в проницаемые интервалы, но и с образованием глинистой корочки.

На рис. 16 приведен пример локализации интервалов повышенной проницаемости в карбонатах по кривым бокового каротажа, зарегистрированных до и после изменения сопротивления бурового раствора. Указанным интервалам также соответствуют участки с расходящимися кривыми.

В монолитных породах, где может быть развита редкая сеть разрозненных трещин и где локализация проницаемых зон по существу сводится к локализации отдельных трещин, поставленная задача решается менее уверенно. Отдельная трещина не может существенно изменить значение физического свойства в исследуемом объеме, охватываемом измерительной установкой, и поэтому может быть легко пропущена, если учесть, что по каротажной диаграмме различные интервалы мощностью не менее 10—20 см. На практике рассмотренные возможности выделения трещинных коллекторов используются лишь частично. Как правило, причина состоит в слабой информированности ис-

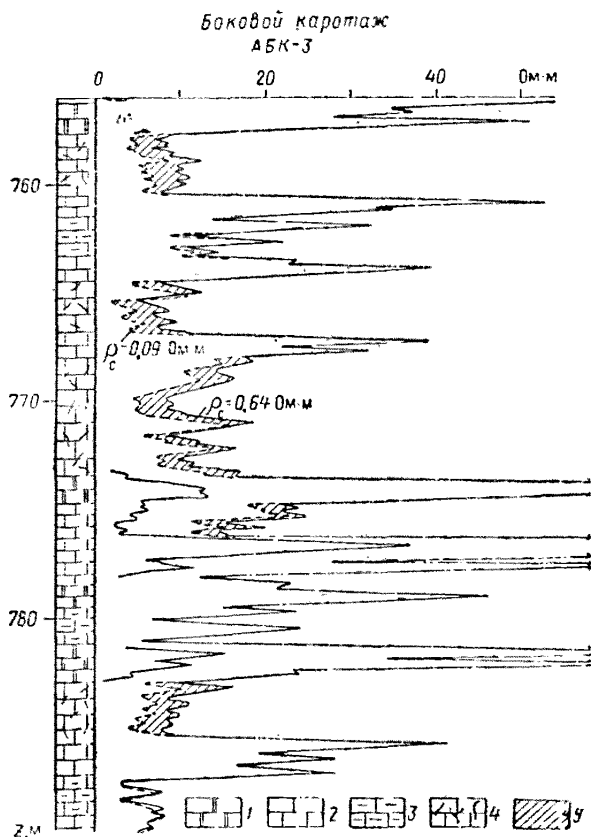


Рис. 16. Пример выделения интервалов повышенной проницаемости в толще известняков по кривым бокового каротажа, зарегистрированным до и после изменения сопротивления бурового раствора.

1 — нерасчлененные карбонатные породы; 2 — известняк; 3 — известняк глинистый; 4 — известняк трещиноватый; 5 — зоны повышенной проницаемости

полнителей об этих возможностях, а также в необходимости согласования технологии бурения с технологией последующих каротажных исследований.

Разумеется, если бурение скважины возможно осуществить с промывкой забоя чистой водой, нет необходимости прибегать к мероприятиям, обеспечивающим возникновение рассмотренных предпосылок. В этом случае иногда возникает возможность выявить трещиноватые интервалы пород по состоянию стенок скважины, используя измерения каверномером. Однако в общем случае эти данные весьма приближенные и самостоятельного значения иметь не могут.

Используя эффект изменения геофизического свойства в околоскважинной зоне в связи с проникновением фильтрата

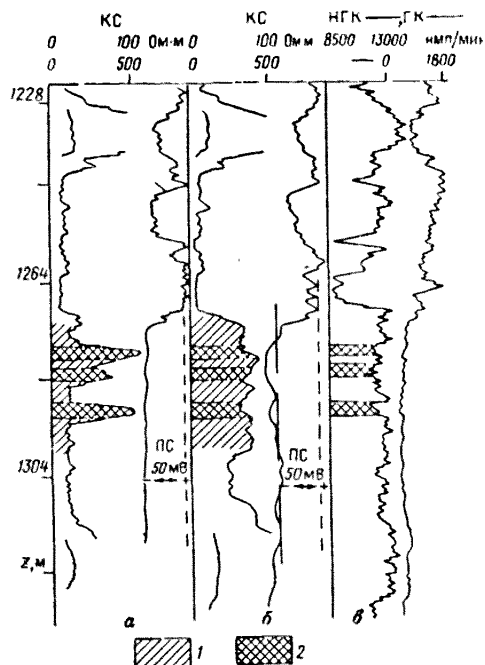


Рис. 17. Пример выделения трещиноватых участков в толще пористого коллектора (скв. 1510, Шаронская площадь, $d_c = 300$ мм [61]).

а—кривая КС и ПС, замер 3.III.1958 г. при заполнении скважины водой с удельным сопротивлением 1,5 Ом·м; б—кривая КС и ПС замер 18.III. 1958 г. при заполнении скважины глинистым раствором с удельным сопротивлением 1,5 Ом·м, в—кривые НГК и ГК.

1—интервалы с повышенными значениями коллекторских свойств; 2—интервалы с преобладанием трещиноватого типа пустотности

бурового раствора, возможно даже разграничить участки с проницаемостью межгранулярного типа и участки с проницаемостью, обусловленной двойной пористости. Предпосылкой к такому разделению может служить различие в проницаемости породы с неразвитой трещиноватостью и подверженной последней. Фильтрат бурового раствора в трещиноватых интервалах породы проникает на большую глубину, так что по данным электрокаротажа малыми зондами зона проникновения оказывается больше глубинности исследования. Если, не меняя свойств раствора, увеличить забойное давление, будет происходить дальнейшее проникновение фильтрата в блоковую структуру породы, что может быть обнаружено по повторным измерениям сопротивления. Пример подобного исследования приведен на рис. 17, заимствованном

из работы [61]. В пределах глубин 1270—1300 м по комплексу исследований различными методами выделяется интервал пород с повышенными коллекторскими свойствами. При повторном измерении электрического сопротивления (кривая 3) в связи с изменением плотности раствора произошло принудительное проникновение фильтрата в блоковую часть коллектора. Это отразилось на фоне аномалии кривой КС в интервалах 1273—1279, 1284—1289; 1293—1300 м. Указанную задачу можно решить, прибегнув к изменению свойств раствора и одновременно повышению забойного давления. Периодическая регистрация кривых КС или микрондирования может позволить по скорости изменения сопротивления судить о природе проницаемости соответствующего интервала разреза.

В тех случаях, когда скважина бурится с промывкой забоя чистой водой или до проведения каротажных исследований очищена от глинистого раствора, могут возникнуть благоприятные условия для локализации проницаемых интервалов разреза по наблюдениям за интенсивностью фильтрационных процессов в глубинном разрезе. В разрезе трещиноватых пород характерными являются весьма сложные условия циркуляции подземных вод. Пути циркуляции подземных вод в основном совпадают с зонами трещиноватости пород независимо от генетического типа этой трещиноватости. Благодаря сложной пространственной ориентировке водопроводящих путей, неоднородному фильтрационному сечению, горизонты трещинных вод характеризуются в разрезе весьма сложным распределением потенциальных нагрузок. В условиях соединения скважиной различных подземных водотоков образуется замкнутая гидродинамическая система, уравнивающаяся благодаря перераспределению нагрузок и расходов воды с учетом нового канала.

В этих условиях интерпретационными признаками проницаемых интервалов разреза являются: а) интервалы опреснения раствора электролита в скважине, фиксируемые по кривым резистивиметрии; б) интервалы приращения расходы воды по стволу скважины, фиксируемые расходограммой в неработающей или работающей скважине.

Указанные интерпретационные признаки могут считаться прямым индикатором проницаемых интервалов разреза. Однако, как и в других случаях использования дистанционно работающих технических средств, нужно учитывать разрешающие способности основанных на этих измерениях методов.

При использовании метода резистивиметрии для исследования трещиноватых разрезов нужно учитывать, что отображаемая кривыми резистивиметрии картина опреснения электролита в стволе скважины является, как правило, результатом действия двух составляющих потока: горизонтальной (по подземному потоку) и вертикальной (по стволу скважины). Вследствие этого при истолковании данных резистивиметрического каротажа нужно учитывать ряд особенностей кривых.

При использовании метода расходометрии изучается только вертикальная составляющая потока. По данным этого метода могут быть выявлены все водоносные зоны, если поступление воды из них (или отток) превышает чувствительность измерительного прибора. Соответственно разрешающая способность в выделении границ определяется величиной притока (или оттока) воды на интервале шага измерений. Чем эта величина больше, тем детальнее можно рассчитать гидрогеологический разрез трещиноватых пород по данным расходометрии.

На рис. 18 приведен пример выделения водоносных зон в разрезе по расходограмме, полученной при восстановленном статическом уровне в скважине. Эти данные сопоставлены с

Километры
уровня воды
по бурению
2 1 0 -1 -2

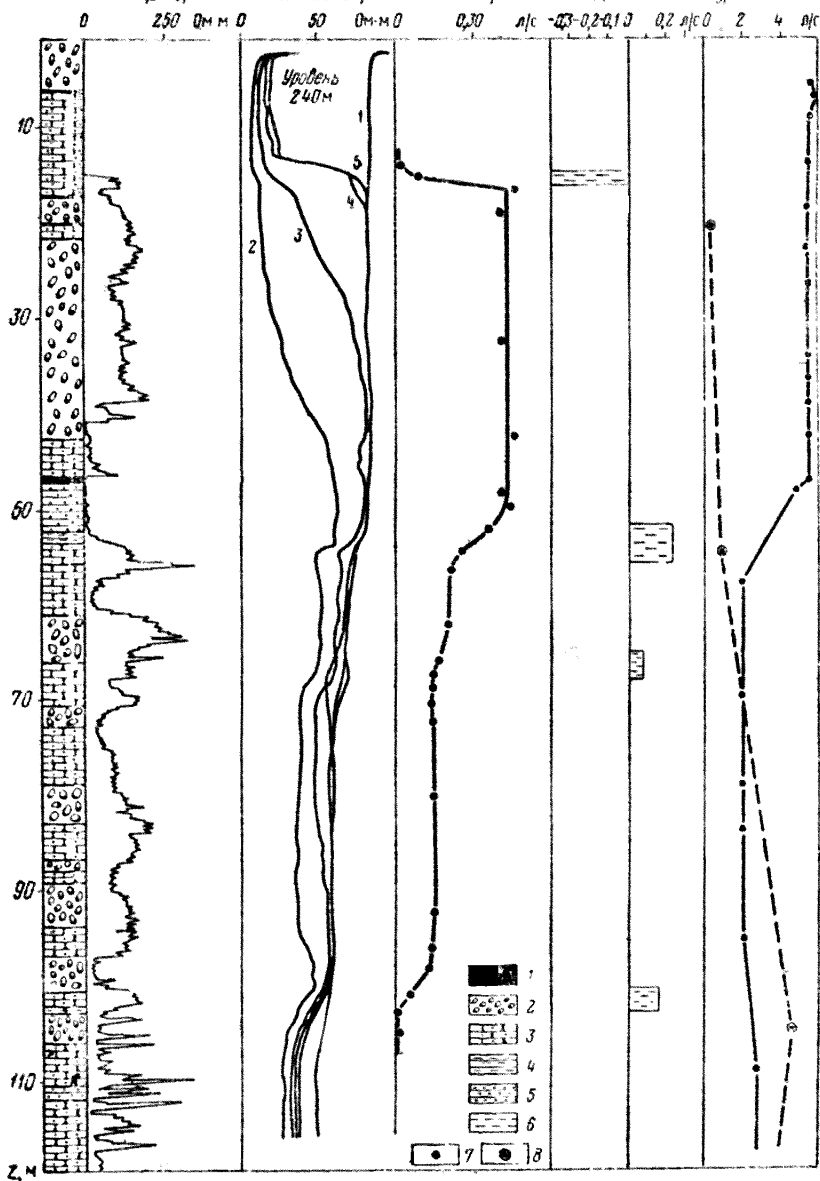
Здесь же дебит
по интервалам
бурения

КС
А1,0 М0,1 N

Резистивиметрия

Расходоиметрия

Дебит



данными резистивиметрии, полученными при тех же условиях, и данными гидрогеологического опробования скважины в процессе бурения.

Для создания условий, благоприятствующих расходометрическому исследованию трещиноватых разрезов, целесообразно прибегнуть к возбуждению скважины (гидравлическому, гидродинамическому) путем проведения откачек, наливов и т. п. в исследуемой скважине или в соседней, находящейся в исследуемой во взаимодействии. Использование возбуждений является обязательным при необходимости получения сравнительных количественных показателей фильтрационных свойств различных интервалов разреза, о чем будет указано в соответствующем разделе.

Для выявления трещиноватых обводненных зон в разрезе методы резистивиметрии и расходометрии применяются в настоящее время наиболее широко. Правда, в последние годы наблюдается постепенное уменьшение объемов резистивиметрии, что связано с кажущейся большей определенностью данных расходометрического каротажа. Вместе с тем анализ результатов резистивиметрического каротажа во многих производственных организациях показывает, что при выявлении проницаемых горизонтов (зон) в разрезах скважин по данным резистивиметрии допускается ряд существенных погрешностей. Это приводит к искажению или утрате полезной информации о водоносном разрезе.

Рассмотрим основные особенности интерпретации данных резистивиметрии в разрезах трещиноватых пород для выявления обводненных зон.

Если скважиной вскрыт один водоносный горизонт, состоящий из одной или нескольких разобценных водоносных зон с равным статическим уровнем, и уровень воды в скважине в момент проведения исследования соответствует ему, задача выявления водоносных зон в разрезе сводится к выявлению мест фильтрации подземных вод через стенки скважины. На кривых резистивиметрии это проявляется в постепенном увеличении электрического сопротивления электролита в стволе скважины против интервалов фильтрации. Характерным признаком именно такого взаимодействия водоносного горизонта со скважиной является смещение резистивграмм от малых значений удельного сопротивления к большим, наблюдаемое против всей водоносной толщи. Выделив по семейству резистивграмм места опреснения

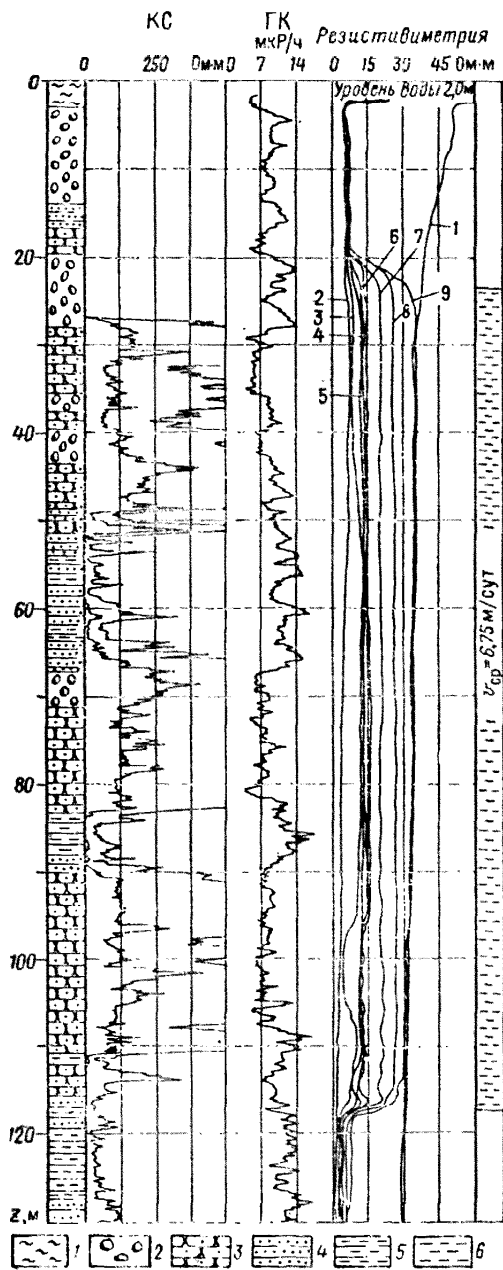
Рис. 18. Пример выделения водоносных зон в разрезе по данным расходометрии в условиях естественного перетекания (в сопоставлении с данными резистивиметрии и гидрогеологических наблюдений в процессе бурения). 1 — уголь; 2 — конгломерат; 3 — песчаник; 4 — аргиллит; 5 — алевролит; 6 — водоносные зоны; 7 — удельный дебит по наливу; 8 — удельный дебит по откачкам. Расходограмма получена с помощью расходомера инжекционного типа. 1—5 — порядковые номера резистивграмм

электролита, тем самым выделяют водоносные зоны. Против водоупорных интервалов пород концентрация раствора и его сопротивление остаются неизменными.

На рис. 19 приведен пример выявления водоносного горизонта в разрезе юрских отложений Тутуяской мульды в Кузбассе. Водоносный горизонт выделяется по равномерному опреснению электролита фильтрующейся водой, выраженному в виде параллельного друг другу смещения резистививграмм. Расчет скорости фильтрации по методике И. И. Гринбаума [22] показал, что проницаемость пород водоносного горизонта остается практически постоянной от его кровли до подошвы. Следует отметить также то, что геологический разрез водоносного горизонта представлен пестрым чередованием алевролитов, песчаников и конгломератов, характеризующихся различными показаниями КС и ГК и почти одинаковой проницаемостью. Ниже по разрезу те же породы являются водоупорами. Этот пример наглядно показывает, насколько условным может быть литоло-

Рис. 19. Пример выделения одиночного водоносного горизонта по данным резистививметрии.

1 — суглинки; 2 — конгломерат; 3 — песчаник; 4 — алевролит; 5 — аргиллит; 6 — водоносный горизонт; 1—9 — порядковые номера резистививграмм



гический принцип гидрогеологического разреза, а также преимущество непосредственного изучения проницаемости пород в скважине при помощи каротажа.

Наблюдение смешивающихся параллельно оси скважины резистивграмм для выделения водоносного горизонта с указанными особенностями является необходимым, однако еще не достаточным условием.

На рис. 20, ж показан пример исследования скважины методами резистивиметрии и расходометрии. В результате рассмотрения семейства резистивграмм, руководствуясь указанным выше критерием, можно было бы предположить наличие в данном разрезе водоносного горизонта с примерно постоянной фильтрующей способностью по вертикали. Такое предположение показалось бы вполне убедительным, учитывая, что геологический разрез представлен однородными конгломератами. Однако результаты расходометрии убеждают в ином строении гидрогеологического разреза, а именно в его резкой неоднородности и локальной водоносности. Причина противоречивости данных резистивиметрии и расходометрии объясняется достаточно просто. Дело в том, что скважина исследовалась в период проведения пробно-эксплуатационной откачки из соседней скважины, взаимодействующей с данной. Влияние откачки сказалось на перераспределении напоров в пространстве в соответствии с фильтрационными свойствами, емкостью и протяженностью водоносных зон, что отразилось в своеобразии данных резистивиметрии и расходометрии. Отдельные интервалы повышенной водоносности связаны с развитием трещиноватости.

Если скважиной вскрывается сразу несколько водоносных горизонтов или зон с различным положением напоров относительно условной плоскости отсчета, то по стволу скважины происходит переток воды из зон с более высоким напором в зоны с меньшим напором. Выявление обводненных интервалов разреза в этом случае сводится к выявлению мест поступления воды в скважину и мест ее ухода (поглощения). Кривые резистивиметрии в этих условиях имеют иной вид, чем в предыдущем случае. Общим в них остается то, что интервалы поступления пресной воды в скважину, соответствующие отдающим зонам, характеризуются увеличением удельного электрического сопротивления раствора во времени. Выше или ниже отдающей зоны в зависимости от направления перетока по стволу наблюдается перемещение границы раздела пресной воды и электролита, фиксируемое смешивающимися по глубине резистивграммами. Поглощающая зона фиксируется как предел перемещения по стволу границы электролит—вода.

В зависимости от расположения, активности и количества отдающих и поглощающих зон в разрезе скважины семейство резистивграмм может иметь различные особенности, и расшифровка их нередко представляет трудную задачу. Причина

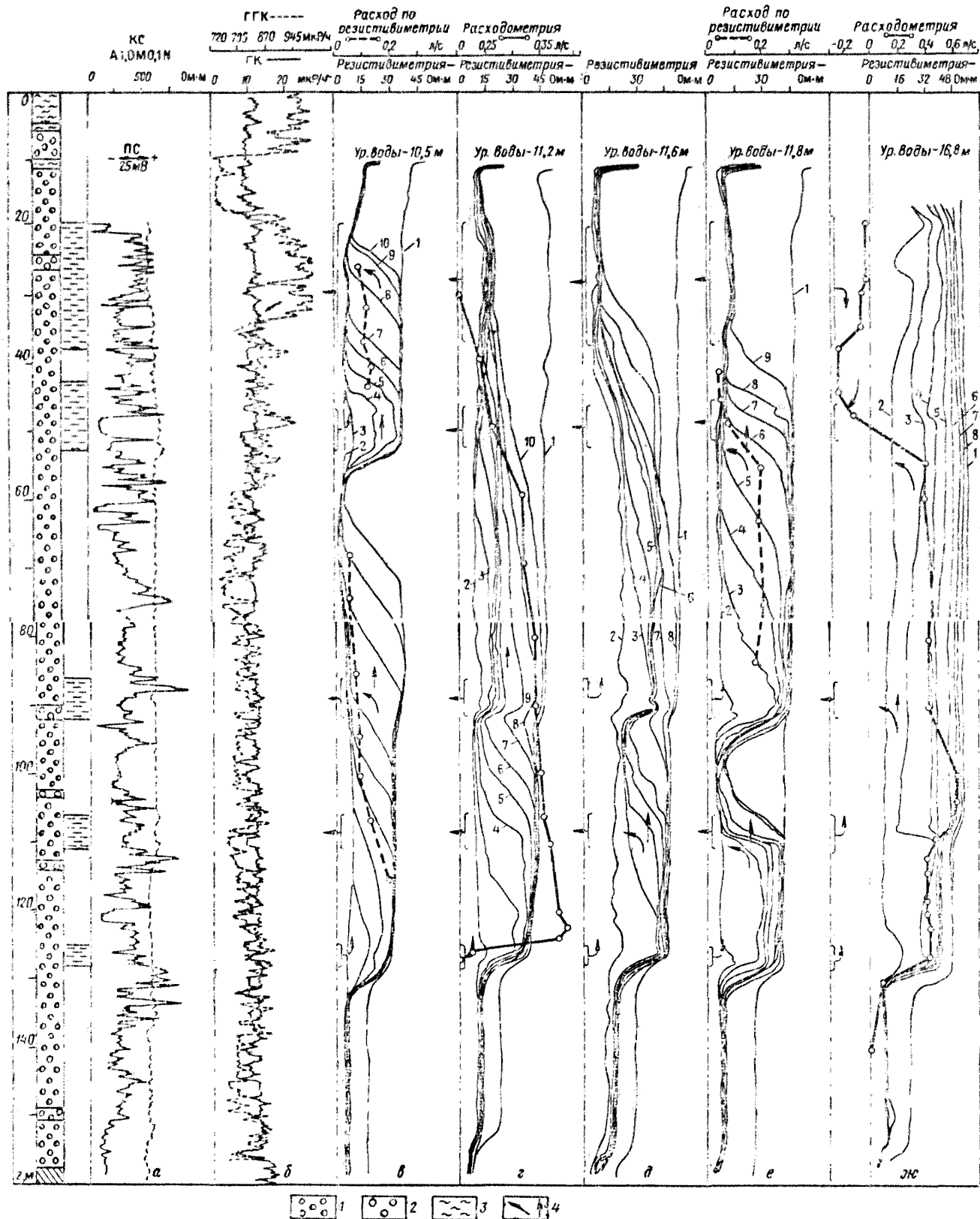
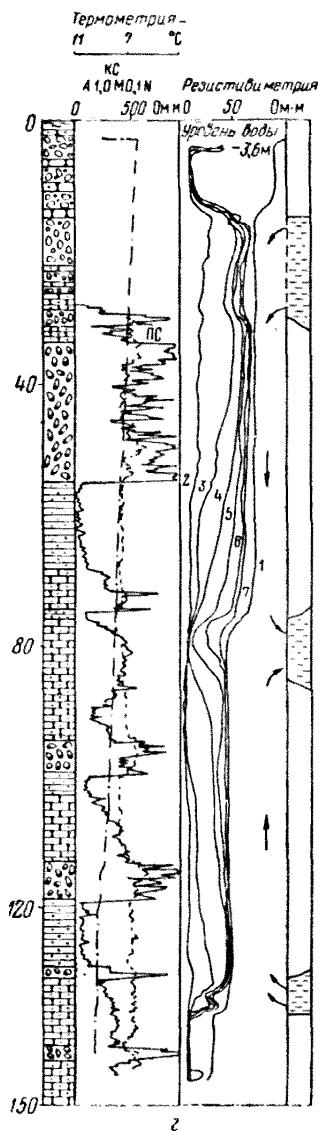
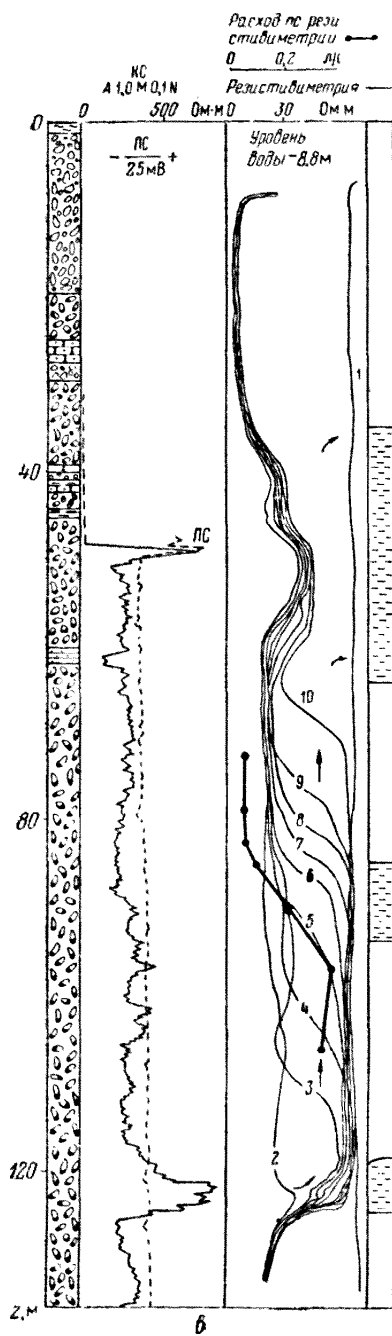


Рис. 20. Пример изменения форм диаграмм резистивиметрии при изменении гидродинамической обстановки.

а — электрокартаж; б — радиоактивный картаж; в — резистивиметрия при статическом уровне 10,5 м; г — резистивиметрия и расходомерия при откачке из скважины 11 Ц с $s=6,4$ м, $Q=40$ л/с; д — резистивиметрия при откачке из скважины 14 Ц с $s=11,51$, $Q=60$ л/с; е — то же с $s=24,02$ м; $Q=80$ л/с; ж — резистивиметрия и расходомерия при спаренной пробно-эксплуатационной откачке из скважин 7 Ц и 14 Ц. 1 — конгломерат; 2 — галечник; 3 — суглинок; 4 — направления перетоков; 1—10 порядковые номера резистивиграмм



этих затруднений состоит в основном в технических возможностях метода. В связи с этим наиболее отчетливо отмечаются водоносные зоны (отдающая и поглощающая), расположенные у верхней и нижней границ обводненной толщи. Промежуточные зоны отмечаются менее уверенно, а иногда пропускаются. Благоприятным условием выделения промежуточных отдающих зон является условие, когда дебит их близок или больше дебита крайней отдающей зоны или они достаточно удалены друг от друга. Относительно слабые промежуточные-водоносные зоны могут быть обнаружены по замедлению (для поглощающих) или убыстрению (для отдающих) перемещения границы раздела электролит—вода. При значительном перетоке воды по стволу скважины и относительно близком друг к другу расположении зон бывает трудно зафиксировать даже несколько положений границы раздела, тогда промежуточные зоны практически не выделяются (см. рис. 18). В отдельных случаях опыт и интуиция интерпретатора подсказывают положение этих зон по различным косвенным признакам на кривых, трудно поддающихся систематизации и обобщению.

Ниже на рис. 21 приведены примеры резистивиметрических исследований скважин с относительно благоприятными условиями взаимодействия водоносных зон.

Разрез на рис. 21,а представлен чередованием конгломератов, песчаников и алевролитов, удовлетворительно дифференцируемых по кривым КС. Гидрогеологический разрез представлен тремя водоносными зонами. Благоприятное соотношение напоров подземных вод, приуроченных к этим зонам, позволяет надежно выделить их по кривым резистивиметрии. Так, равнодействующий напор двух нижележащих водоносных зон оказался равным напору верхней зоны. Поэтому приток из нижележащей зоны полностью поглощается в средней зоне, а верхняя водоносная зона отмечается самостоятельно как фильтрующий поток. Выделить эти зоны не представляет труда.

На рис. 21,б представлен другой благоприятный случай выделения водоносных зон по данным резистивиметрии. Гидродинамическая обстановка здесь аналогична предыдущему примеру с той разницей, что водообмен осуществляется между двумя верхними водоносными зонами, а нижняя зона отмечается как фильтрующий поток. Следует обратить внимание, что геологический разрез представлен литологически однородной конгломератовой толщей.

Разрез скважины на рис. 21,в представлен конгломератами с редкими включениями песчаника и алевролита. В гидрогеологическом отношении разрез состоит из водоносных зон с различными гидравлическими напорами. По стволу скважины наблюдается переток воды из нижней зоны в верхние. По семейству резистививграмм можно выделить все зоны. Нижняя отдающая зона отмечается резким опреснением электролита сразу же

после засоления скважины (кривая 2) и смещением кривых 3—10 вверх по стволу. Подошва зоны отчетливо очерчивается резистивиграммами, фиксирующими неподвижную границу раздела электролит—вода на глубине 124 м. Кровля зоны обнаруживается менее уверенно. Верхняя зона также отмечается опреснением электролита, хотя и плохо выраженным. Это объясняется тем, что количество фильтрующейся воды через стенки скважины примерно равно количеству поступающего в этот интервал электролита из нижней части разреза. Подсчет объемной скорости перетекания воды по движущейся границе электролит—вода позволяет выделить промежуточную поглощающую зону по убыванию величины скорости. Точность определения границ этой зоны, как легко видеть, зависит от количества точек на графике объемной скорости. Так точность определения нижней границы можно оценить величиной ± 3 м, а верхней — ± 1 м.

В практике встречаются случаи, когда промежуточное положение в разрезе занимает отдающая водоносная зона, а крайними являются зоны поглощающие, и наоборот. Такие случаи особенно часты при исследовании скважин, находящихся в зоне влияния эксплуатационных или других работающих скважин. Соответствующий пример выявления водоносных зон показан на рис. 21,г.

Однако в большинстве случаев применения метода резистивиметрии для выявления водоносных зон в разрезе в условиях активного перетока воды из одних зон в другие получаются более скромные результаты. В этих случаях удается устанавливать общую или наиболее активную мощность водоносной толщи и места резкого изменения проницаемости в промежуточной области (см. рис. 18).

Характерной чертой кривых резистивиметрии в сложных разрезах является также то, что в условиях взаимодействия многих зон переток фиксируется слабо наклоненными кривыми, поведение которых без достаточного опыта можно принять за проявление неравномерной фильтрации подземных вод в разрезе (см. рис. 18 и 21), а в некоторых случаях семейство резистивиметрических кривых имеет вид, совершенно не отличимый от вида кривых в случае одиночного фильтрующего водоносного горизонта (см. рис. 20,ж).

Для получения более объективных сведений об условиях обводнения разреза по данным резистивиметрии практикуются повторные исследования при проведении откачек из соседних разведочных скважин, расположенных от исследуемой в пределах радиуса влияния. Изменение гидродинамической обстановки, вносимое откачкой, сказывается на соотношении напоров водоносных зон исследуемой скважины, что приводит к изменению характера опреснения электролита и возможности выявления дополнительных особенностей на кривых (см. рис. 20).

ИЗУЧЕНИЕ ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В проблеме изучения емкостных свойств трещиноватых горных пород по каротажу в настоящее время можно рассматривать две неравные по уровню разработанности части: оценка общей емкости трещиноватого коллектора; оценка активной емкости коллектора.

При гидрогеологических исследованиях обычно больший интерес представляет характеристика активной части пустотного пространства коллектора. Во многих случаях она может быть приравнена к водоотдаче. Однако если первая часть задачи может быть решена в общем успешно по данным каротажа, то возможность решения второй находится в стадии изучения. При использовании геофизических методов для изучения трещиноватых пород активная пористость приравнивается к трещинной пористости.

При решении указанных задач можно ориентироваться только на рассмотрение значений физических свойств, измеряемых при каротаже, в связи с различным структурным состоянием пород. Последнее определяется как общей, открытой пустотностью, так и типом пустотного пространства, минералогического состава породы и заполнителя пустот. Поэтому между емкостью коллектора и абсолютными значениями физических свойств не существует однозначных зависимостей. В конкретных природных условиях, где диапазон вариаций минералогического состава и типов коллекторов часто ограничен, удается установить корреляционные зависимости между емкостью коллектора и значением некоторых физических свойств (электрическое сопротивление, интенсивность рассеянного и вызванного гамма-излучения, скорость распространения упругих волн и др.), получаемых соответственно при электрическом, гамма-гамма-, нейтронном гамма- и акустическом (ультразвуковом) каротаже. Теснота связи таких зависимостей указывает, имеем ли мы дело с одним структурным типом коллектора или в рассматриваемой выборке участвуют различные типы коллекторов по структурному и минералогическому признаку. Если такой анализ проведен на поздних стадиях исследования месторождения, его можно использовать для типизации коллекторов, особенно если в распоряжении имеются зависимости коллекторских свойств от различных геофизических параметров.

На ранних стадиях исследования месторождений корреляционные зависимости, построенные по ограниченному числу двухсторонних наблюдений (измерения на образцах и каротажные измерения), используются в качестве рабочих (эталонных) для рядовых оценок пустотности по данным каротажа.

Необходимо отметить еще одну общую особенность указанных методов оценки пустотности горных пород. Речь идет о

разрешающей способности методов при расчленении разреза на интервалы с различной пустотностью. Учитывая непрерывный характер регистрации каротажных показателей и конечный размер измерительных зондов, можно, видимо, принять пороговые значения мощности оцениваемого интервала разреза равными 1,5—2 размерам этих зондов с учетом последующего приведения фактических значений к значениям пластов бесконечной мощности. Предполагается, что в пределах этой пороговой мощности коллектор является однородным по типу структуры порового пространства, литологии и другим качественным признакам. Разграниченные таким образом участки разреза, отличаясь по значениям регистрируемых при каротаже показателей, при прочих постоянных условиях будут отражать изменение емкостных свойств коллектора.

В связи со сказанным уместно определить критерий чувствительности метода к изменениям величины пустотного пространства на интервалах разреза, соответствующих или больших пороговой мощности. Таким критерием в первом приближении может служить выполнение неравенства $n_1/n_2 \gg m^{-1}$ для электрического, акустического и нейтронного гамма-каротажа и $n_2/n_1 \gg m^{-1}$ для гамма-гамма-каротажа; n , n_1 , n_2 — соответственно значение измеряемого при каротаже показателя, значение того же показателя для монолитной породы (скелета) и для воды (заполнителя пор); m — отношение объема пустот к общему объему породы (общая пустотность) в пределах мощности оцениваемого интервала и глубинности исследований данным методом. Если приведенные неравенства выполняются, можно считать, что относительные изменения измеряемых при каротаже показателей n/n_2 соответствуют вариациям значений емкостных свойств породы данного качественного типа. Этот критерий был установлен И. И. Горюновым для электрокаротажа [19] и распространен нами на другие методы, хотя между ними нет полной аналогии.

Если нас интересует изменение трещинной пористости на фоне гранулярно-блоковой пористости, критерий чувствительности остается тем же, но n_1 в этом случае будет характеризовать значение показателей для блока, а m — вторичную (трещинную) пористость коллектора.

Таким образом, по данным исследования методами электро-гамма-гамма-, нейтронного гамма- и акустического каротажа могут быть выявлены трещинные зоны при условии, если их мощность превосходит 1,5—2 размера измерительной установки, а емкость обеспечивает выполнение указанного неравенства. При этом оценивается средневзвешенное значение емкостных свойств в пределах всего выделенного интервала. Поскольку опорными данными для корреляции и интерпретации каротажных материалов обычно служат результаты анализа керна (точные определения), при оценке общей и особенно открытой

пустотности трещинных пород в целом может быть получено заниженное значение. Это является также одной из причин большой дисперсии корреляционных зависимостей.

Ниже рассмотрим возможность оценки общей и активной пустотности трещиноватых пород по данным каротажа.

Оценка общей пустотности трещинных пород

Метод плотностного гамма-гамма-каротажа

В основе использования данных плотностного гамма-гамма-каротажа лежит, с одной стороны, зависимость регистрируемой интенсивности рассеянного гамма-излучения $I_{ГГК}$ от плотности породы и, с другой, — зависимость плотности породы от ее пористости. Первая зависимость устанавливается эмпирическим путем, учитывающим влияние скважинных условий измерения, нестабильность измерительной аппаратуры, влияние минералогической изменчивости коллектора. Вторая зависимость определяется формулой

$$\delta = (1 - k_n) \delta_{ск} + k_n \delta_v, \quad (II.1)$$

где δ — объемная плотность породы по данным ГГК-П; $\delta_{ск}$; δ_v — объемная плотность соответственно минеральной части скелета породы и воды; k_n — коэффициент общей пористости породы.

Значение $\delta_{ск}$ для литологически однородных пород может быть взято из таблиц или определено по керну. Плотность воды в большинстве случаев может быть принята равной единице.

Преимуществом метода ГГК-П перед другими методами каротажа является то, что его показания обладают равной чувствительностью к изменению пористости практически во всем диапазоне ее изменения. Изменения минерализации подземных вод в диапазоне от пресных до слабосоленых, а также вариации структурно-текстурных факторов практически не искажают связи $I_{ГГК}$ с пористостью.

Примеси глинистого материала практически также не существенно влияют на точность оценки k_n по данным ГГК-П, так как минералогические плотности глин и основных породообразующих минералов близки. Однако наличие гидратных оболочек на глинистых частицах в условиях естественного залегания, уменьшающих объем порового пространства, приводит к необходимости учесть в формуле (II.1) разницу между минералогической и объемной плотностью глинистой фракции. В этом случае расчетная формула будет иметь вид

$$k_n = k_{n, ГГК} - C_{гл} \frac{\delta_{ск} - \delta_{гл,з}}{\delta_{ск} - \delta_v}, \quad (II.2)$$

где $k_{пггк}$ — коэффициент пористости, входящий в формулу (II.1); $C_{гг}$ — коэффициент глинистости; $\delta_{гг,з}$ — плотность глинистой фракции в условиях естественного залегания.

Значение дроби в формуле (II.2) по опытным данным Н. А. Перькова и П. Т. Котова находится в диапазоне 0—0,2. Поскольку $\delta_{гг,з}$ не может быть определено достоверно, оценка $k_{пггк}$ производится по формуле (II.1), несмотря на то что при этом в результате будет присутствовать систематическая ошибка, пропорциональная глинистости.

Как указывалось, зависимость $I_{ггк} = f(\delta)$ устанавливается эмпирическим путем. Это обязывает производить отбор керн исследуемых пород и определять δ для построения эталонных корреляционных зависимостей или создавать эталонировочные стенды, имитирующие возможные изменения геологических и скважинных условий измерения.

Во избежание влияния изменчивости скважинных условий измерения и нестабильности измерительной аппаратуры на результат интерпретации обычно используются относительные показания интенсивности рассеянного гамма-излучения

$$\Delta I_{ггк} = \frac{I_{ггк} - I'_{ггк,оп}}{I''_{ггк,оп} - I'_{ггк,оп}}, \quad (II.3)$$

где $I'_{ггк,оп}$, $I''_{ггк,оп}$ — соответственно интенсивность рассеянного гамма-излучения против двух опорных пластов с известной и желательно существенно различной плотностью. Практически наиболее удобным оказывается получать значение $I'_{ггк,оп}$ в емкости, заполненной водой, что будет соответствовать среде с объемной плотностью, равной единице, а $I''_{ггк,оп}$ — получать против заведомо неразрушенных интервалов данных пород. Эти интервалы обычно хорошо представлены керном. Вместе с тем нельзя отрицать целесообразности получения еще хотя бы одной точки в промежуточной части этого интервала плотностей.

Метод нейтронного гамма-каротажа

Интенсивность регистрируемого нейтронного гамма-излучения $I_{нгк}$ и общая пористость водонасыщенных пород $k_{пггк}$ связаны зависимостью, которая в координатах $I_{нгк} - \ln k_{пггк}$ аппроксимируется прямой линией. Практика, однако, показывает, что линейная форма зависимости нарушается в области низких (до 0,03 при размере зонда 0,5—0,6 м) и высоких (более 0,45—0,50) значений пористости. Указанная зависимость строится на основании эмпирических данных и затем используется для оценки $k_{пггк}$ в рядовых исследованиях. Это предопределяет необходимость подъема и анализа представительного керн хотя бы в нескольких точках разреза.

В связи со сказанным исследование может быть осуществлено несколькими методическими приемами.

В разрезе скважины выбирается два опорных горизонта¹, для которых по керну определяется значение общей пористости $k_{п1}$ и $k_{п2}$. По этим данным на полулогарифмическом бланке строится прямая $I_{НГК} = f(k_{п})$, служащая эталонной. Желательно, чтобы породы, выбранные опорными, возможно больше отличались по пористости.

Вариантом этой методики является использование в качестве одной опорной точки показаний $I_{НГК}$ в емкости с водой, что соответствует $k_{п}=1$. Однако в этом случае опорные показания $I_{НГК}$ по условиям измерения оказываются неравноточными. Для исключения влияния нестабильности аппаратуры при сопоставлении показаний НГК по различным скважинам обычно прибегают к относительным значениям интенсивности нейтронного гамма-излучения,

$$\Delta I_{НГК\ x} = 1 - (I_{НГК\ x} / I_{НГК\ оп}), \quad (II.4)$$

где $I_{НГК\ оп}$, $I_{НГК\ x}$ — соответственно интенсивность нейтронного гамма-излучения против опорного и определяемого горизонта; в качестве $I_{НГК\ оп}$ обычно берутся показания против более плотной породы.

Если за опорные значения берутся показания в воде и против плотной породы, то ординаты точек с абсциссами $k_{п1}$ и $k_{п2}$ будут соответственно

$$\Delta I_{НГК\ в} = 1 - (I_{НГК\ в} / I_{НГК\ п}) \approx 1;$$

$$\Delta I_{НГК\ п} = 1 - (I_{НГК\ п} / I_{НГК\ п}) = 0,$$

где $I_{НГК\ в}$, $I_{НГК\ п}$ — соответственно зарегистрированная интенсивность НГК в воде и против плотной породы, принятой за опорный горизонт; $\Delta I_{НГК\ в}$, $\Delta I_{НГК\ п}$ — относительная интенсивность НГК в тех же условиях.

В связи с тем, что зависимости $\Delta I_{НГК} = f(k_{п})$ имеют экспоненциальный характер, значения $\Delta I_{НГК\ x}$ в основном располагаются в нижней части этого диапазона.

Интенсивность гамма-излучения, регистрируемая при НГК, определяется общим водородосодержанием в породе, которое принимается за эквивалент пористости. В заглинизированных или загипсованных породах это не так, поскольку глины и гипс содержат значительные количества связанной воды. Кроме того, глинистая фракция обладает по сравнению с другими минералами повышенным естественным гамма-излучением, которое регистрируется суммарно с вызванным гамма-излучением. Исключение этой доли гамма-излучения производится по дан-

¹ В ряде работ [33, 36] рекомендуется использовать горизонты с выдержанными в региональном плане геологическими и коллекторскими характеристиками. Это может уменьшить число определений пористости по керну в исследуемых скважинах.

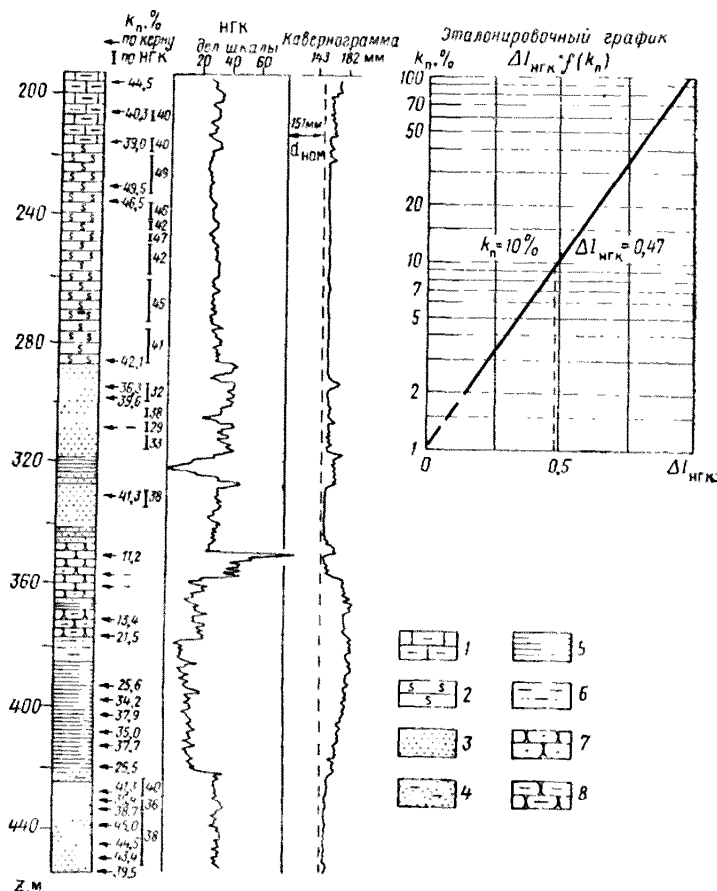


Рис. 22. Пример определения пористости пород по данным НГК в разрезе мезозойских отложений в районе Курской магнитной аномалии (по Н. А. Огильви, Д. И. Федорович).

1 — мергель; 2 — мел; 3 — песок; 4 — песок глинистый; 5 — глина; 6 — глина песчаная; 7 — песчаник; 8 — песчаник глинистый

ным гамма-каротажа, который включается в комплекс исследования скважин:

$$I_{НГК} = I_{НГК\ p} - k I_{ГК}, \quad (II.5)$$

где $I_{НГК\ p}$ — регистрируемая интенсивность гамма-излучения при НГК; $I_{ГК}$ — интенсивность гамма-излучения по данным метода ГК; k — коэффициент, учитывающий различие интегральных чувствительностей каналов ГК и НГК; в аппаратуре типа ДРСТ значение $k=1$.

Использование для построения эталонных зависимостей величин k_p загипсованных или заглинизированных пород предпо-

ределяет получение заниженных значений пористости для пород с меньшим содержанием гипса или глинистого материала. Это занижение будет тем значительней, чем меньше пористость породы. Поэтому целесообразно при построении эталонных зависимостей использовать не значение k_n , полученное в результате лабораторного анализа керна, а значение

$$W_{\Sigma} = k_n + (W_{\text{мол}} + W_{\text{кр}}) C, \quad (II.6)$$

где W_{Σ} — суммарное влагосодержание; $W_{\text{мол}}$ — максимальная молекулярная влагоемкость; $W_{\text{кр}}$ — содержание кристаллизационной воды; C — коэффициент глинистости или загипсованности.

Соответственно из значения пористости, полученного по эталонировочному графику $\Delta I_{\text{НГК}} = f(\ln W_{\Sigma})$, необходимо вычесть $(W_{\text{мол}} + W_{\text{кр}}) C$, оценив его по справочнику или экспериментальным исследованиям для данной категории пород.

Коэффициент пористости по данным НГК определяется с большей степенью точности в породах, свободных от указанных примесей. Наиболее благоприятными условиями являются разрезы малопористых карбонатных пород. Перспективными для исследования, вероятно, являются разрезы трещиноватых магматических пород. По данным работы [2], возможная погрешность в оценке k_n в диапазоне 0,05—0,2 методом НГК в благоприятных условиях составляет 10%, а в рядовых до 20% от измеряемой величины k_n .

На рис. 22 приведен пример оценки k_n по данным НГК в разрезе мезозойских отложений в районе Курской магнитной аномалии. Результаты сопоставлены с данными определений k_n по керну.

Метод акустического каротажа

Скорость прохождения упругих колебаний в породах связана с их пористостью уравнением среднего времени:

$$k_n = \frac{(v_t - v) v_b}{(v_t - v_b) v}, \quad (II.7)$$

где v , v_b и v_t — соответственно скорость распространения продольной волны в водонасыщенной породе, воде и минеральной части породы.

Для оценки k_n по формуле (II.7) необходимо тем или иным путем оценить v_b и v_t . По данным работы [9] установлено, что в воде нормальной солености v_b меняется от 1470 до 1530 м/с на глубинах до 600 м, до 1580 м/с на глубинах 600—1200 м и до 1640 м/с на глубинах 1200—1800 м.

По Л. М. Бреховских [8] с достаточной для практических целей точностью для расчета v_b может быть использована эмпирическая формула

$$v_s = 1410 + 4,21t - 0,037t^2 + 1,14s + 0,18p, \quad (II.8)$$

где t — температура воды в °C; s — соленость воды в ‰; p — гидростатическое давление в кгс/см².

Скорость упругих волн в твердой фазе колеблется в довольно значительных пределах. Так, средние значения v_T , характерные для чистых цементированных песчанников, 5900 м/с, для известняков и доломитов — 6400—7900 м/с. Поэтому в каждом конкретном случае, прежде чем воспользоваться формулой (II.7), необходимо уточнить значение скорости продольных волн в скелете исследуемых пород. Это можно осуществить несколькими приемами. В одном из них, наиболее строгом, строится корреляционная зависимость между скоростью упругих волн и пористостью пород, определяемых по керну. Пересечение этой зависимости с осью, соответствующей $k_n=0$, даст искомое значение v_T .

Ряд авторов [9, 10] отмечают, что при значительной глинизации коллектора, в котором глинистый материал распределен в виде прослоев, включений и т. д., формула (II.7) оказывается недостаточно точной и предлагают

$$k_n = \frac{(v_{ск} - v) v_B}{(v_{ск} - v_B) v} - C_{гл} \frac{(v_{ск} - v_{гл}) v_B}{(v_{ск} - v_B) v_{гл}}, \quad (II.9)$$

где $v_{ск}$, $v_{гл}$ — соответственно скорость упругих волн в скелете породы, представленном только породообразующими минералами, и в глинистой минеральной части; $C_{гл}$ — объемное содержание глинистого материала.

В настоящее время нет достаточно обоснованных методических рекомендаций относительно оценки величин $v_{ск}$ и $v_{гл}$. Это затрудняет пока использование формулы (II.9).

По данным Н. А. Перькова и П. Т. Котова значение второго слагаемого в формуле (II.9) находится в пределах 0,2—0,4. А при незначительном содержании глинистого материала и его дисперсном распространении среди других породообразующих минералов вторым слагаемым в правой части формулы (II.9) можно пренебречь.

Метод акустического каротажа является одним из наиболее перспективных для оценки пустотности цементированных горных пород: песчанников, известняков, доломитов и т. д. По данным работ [9, 24] акустический каротаж обеспечивает большую точность оценки k_n в сравнении с другими геофизическими методами. Видимо, по этой причине в зарубежной литературе акустический каротаж носит также название каротажа пористости.

При использовании для измерений серийной аппаратуры акустического каротажа (типа СПАК) регистрируются кривые интервального времени, обратно пропорционального скорости уп-

ругих волн¹. Расчетные формулы (II.7) и (II.9) в этом случае переписываются в виде

$$k_n = \frac{\Delta t_n - \Delta t_T}{\Delta t_B - \Delta t_T}; \quad (\text{II.10})$$

$$k_n = \frac{\Delta t - \Delta t_{\text{СК}}}{\Delta t_B - \Delta t_{\text{СК}}} - C_{\text{ГЛ}} \frac{\Delta t_{\text{ГЛ}} - \Delta t_{\text{СК}}}{\Delta t_B - \Delta t_{\text{СК}}}, \quad (\text{II.11})$$

где Δt — интервальное время. Индексами обозначено его значение в соответствующих компонентах породы.

Оценка трещинной (активной) пористости пород

Трещинная пористость пород может быть оценена как разность между коэффициентом общей пористости, подсчитанным по данным ГГК-П, НГК или АК, и коэффициентом гранулярной пористости блоков, определенным по керну из оцениваемого трещиноватого интервала разреза.

Электрокаротаж

Существует несколько аналитических зависимостей, связывающих коэффициент трещинной пористости пород с их электрическим сопротивлением при заданных сопротивлениях блока и заполнителя трещин [19]. Эти зависимости получены при различных предположениях о структуре коллектора и его литологии. Но все они предполагают, что коллектор насыщен водой высокой минерализации, при которой в известной мере допустимо рассматривать электропроводность породы, связанную только с геометрией проводящих путей [75]. Поэтому, анализируя эти зависимости с точки зрения возможности использования их для оценки трещиноватости пород, залегающих в зоне активного водообмена, где преобладают пресные или слабосоленые воды, необходимо помнить об этом чрезвычайно важном обстоятельстве, так как с ним будут связаны дополнительные ошибки в оценке параметров трещиноватости. По этой и другим причинам использование различного рода расчетных формул для оценки трещиноватости возможно для сравнительной характеристики различных интервалов разреза.

Если отвлечься от указанных обстоятельств и ориентироваться только на геометрическую схематизацию коллекторов, можно установить ряд зависимостей между трещинной пустотностью пород и их электрическим сопротивлением.

В 1964 г. А. М. Нечай предложил выражение

¹ Во Всесоюзном проектно-изыскательском и научно-исследовательском институте им. С. Я. Жука Министерства энергетики и электроники СССР (Гидропроект) разработана аппаратура ультразвукового каротажа, с помощью которой производятся дискретные измерения скорости упругих волн, распространяемых по породе [68].

$$k_T = A \frac{\rho_B (\rho_\delta - \rho_\Pi)}{\rho_\Pi (\rho_\delta - \rho_B)}, \quad (\text{II.12})$$

где k_T — коэффициент трещинной пористости; ρ_B — удельное сопротивление породы без трещин (блока); ρ_B — удельное сопротивление заполнителя трещин (воды); ρ_Π — удельное сопротивление трещиноватой породы; A — коэффициент, учитывающий анизотропию породы (для изотропной среды $A=1,5$).

Для сильно трещиноватых пород с равновероятным направлением трещин (хаотической трещиноватостью) И. И. Горюновым [18] было предложено выражение

$$\frac{1}{\rho_\Pi} \approx \frac{1}{\rho_B} + \frac{0,5k_T}{\rho_B}. \quad (\text{II.13})$$

Для гранулярно-трещинной породы было предложено выражение, в котором гранулярная и трещинная пористость разделены путем использования в выражениях (II.12) и (II.13) формулы Арчи:

$$\frac{\rho_B}{\rho_B} = \frac{1}{k_{гр}^m}, \quad (\text{II.14})$$

где $k_{гр}$ — коэффициент гранулярной пористости; m — структурный показатель, устанавливаемый эмпирически.

В результате получены расчетные формулы

$$\rho_\Pi \approx \frac{A\rho_B}{Ak_{гр}^m + k_T}; \quad (\text{II.15})$$

$$\rho_\Pi \approx \frac{\rho_B}{k_{гр}^m + 0,5k_T}. \quad (\text{II.16})$$

Эти зависимости не являются точными даже при полном совпадении геометрии реальной и идеализированной породы. Структуры реальных пород всегда сложнее и разнообразнее идеализированных. Это обязывает эмпирически устанавливать коэффициент A и показатель m в приведенных формулах. Из данных геофизических измерений в скважинах можно получить лишь значение ρ_Π и ρ_B . Учитывая это обстоятельство, можно предложить несколько методик сравнительной оценки пород по величине трещиноватости, использующих измерения электрического сопротивления, в зависимости от условий бурения скважины.

1. Бурение скважины с промывкой забоя чистой водой. По данным БКЗ или БК (боковой каротаж) определяется значение ρ_Π . Значение ρ_B находится в результате анализа проб воды, поднятой с соответствующей глубины, или по данным измерения скважинным резистивиметром. В результате анализа керна определяется сопротивление ρ_B монолитной породы, насыщенной при-

родной водой. Далее по формуле (II.12) или (II.13) производится оценка k_T породы.

Такой прием применим как для чисто трещинных пород, так и для порово-трещинных при условии $\rho_v < \rho_b$, $\overline{k_T}$, так как по И. И. Горюнову только в этом случае трещиноватость будет сказываться определяющим образом на изменении удельного электрического сопротивления породы. Нетрудно видеть, что этот критерий применимости данного способа оценки трещиноватости будет выполняться в основном для пород высокого сопротивления: известняков, доломитов, магматических пород и т. д.

Долю пустотного пространства, приходящегося на трещины, можно оценить также, воспользовавшись формулой (II.15) или (II.16), предварительно определив k_{gr} по керну и m по формуле (II.14).

2. Бурение скважины с промывкой забоя глинистым раствором. Если имеются сведения о сопротивлении воды (по данным опробования соседних скважин), то оценка трещиноватости может быть произведена путем, изложенным выше.

В иных случаях, кроме определения ρ_n по БКЗ, производится измерение сопротивления $\rho_{пп}$ (промытой зоны) микрозондами. Это сопротивление соответствует сопротивлению той же породы с другим заполнителем пор ρ_ϕ (сопротивление фильтрата бурового раствора, определяемого по палеткам [23]).

Оценка k_T выполняется по формуле

$$k_T = \frac{2\rho_\phi \rho_v (\rho_{пп} - \rho_n)}{\rho_{пп} \rho_n (\rho_\phi - \rho_v)}. \quad (II.17)$$

Применение этой методики предполагает, что при бурении подземная вода вытесняется фильтратом только из трещин, а в блоках остается незамещенной. В тех случаях, когда такое допущение кажется сомнительным, необходимо прибегнуть к определению сопротивления блоковой части породы по керну, насытив его фильтратом бурового раствора, а оценку k_T осуществить по формуле

$$k_T = \frac{2\rho_\phi (\rho_{бб} - \rho_{пп})}{\rho_{пп} \rho_{бб}}, \quad (II.18)$$

где $\rho_{бб}$, $\rho_{бв}$ — соответственно сопротивление блока, насыщенного фильтратом бурового раствора и водой.

Если дополнительно определить по керну гранулярную пористость блока, то, пользуясь формулой (II.16), можно оценить часть пространства, занятого трещинами.

При тех же условиях проводки скважины для оценки трещиноватости пород могут быть использованы повторные электрокаротажные исследования.

По данным БКЗ или микрозондирования определяются значения $\rho_{пп}$ и ρ' , для раствора, который использовался при буре-

нии. Затем производится промывка скважины под давлением с применением глинистого раствора с сопротивлением, в 3—5 раз отличающимся от сопротивления первоначальной буровой жидкости. Осуществляется повторная регистрация кривых БКЗ или микрозондирования, и определяются значения $\rho_{пп}''$ и ρ_{ϕ}'' . Расчетная формула для k_{τ} аналогична формуле (II.17):

$$k_{\tau} = \frac{2\rho_{\phi}'\rho_{\phi}''(\rho_{пп}'' - \rho_{пп}')}{\rho_{пп}'\rho_{пп}''(\rho_{\phi}'' - \rho_{\phi}')} \quad (II.19)$$

Здесь также предполагается, что вода, заключенная в блоках, остается не замещенной фильтратом раствора.

При использовании перечисленных методик результаты оценки трещиноватости будут содержать систематические ошибки, связанные с априорными предположениями о хаотической трещиноватости и недоучетом физико-химических явлений, влияющих на величину сопротивления пород при низких концентрациях насыщающей породу воды. По этой причине описанные методики могут использоваться только для получения сравнительных данных о трещиноватости пород с погрешностью порядка $\pm 50\%$ [46, 48].

Фотокаротаж

По данным фотографирования стенок скважины с помощью скважинного фотоаппарата можно прямым путем оценить степень трещиноватости пород. Исходным материалом является фотоснимок стенки скважины при 5—6-кратном увеличении. Выделив на нем некоторую площадь F , подсчитывают в ее пределах протяженность всех трещин l и их раскрытость b . Отноше-

$$\Sigma l/b/F = k_{\tau} \quad (II.20)$$

определяет коэффициент трещиноватости породы.

В процессе обработки фотоснимков самым сложным в настоящее время является определение раскрытости трещин и их площади. В перспективе эта операция, видимо, будет производиться инструментально. На современном техническом уровне скважинного фотографирования на фотоснимках могут быть различимы трещины с раскрытостью 15 мкм и больше [34, 73].

Метод фотокаротажа применим только в скважинах, бурение которых производилось с промывкой забоя чистой водой или промытых перед измерениями.

Оценка водопроницаемости пород

Оценка водопроницаемости трещинных горных пород по каротажу основана на использовании уравнений математической физики, описывающих фильтрацию жидкости в пористой среде. Исходные данные для этого могут быть получены в результате

электролитического, расходомерического и термометрического каротажа. Наиболее разработанным геофизическим методом гидрогеологических исследований в разрезах трещиноватых пород является расходомерический каротаж. На нем и будет сосредоточено внимание. Он использует проявление водопритока или водопоглощения в скважине, вскрывающей неоднородную по фильтрационным свойствам толщу.

В неработающей скважине водопритока и водопоглощения в различных интервалах толщи трещиноватых пород происходят часто из-за различия в условиях транзита подземных вод на различных глубинах: изменчивости мощности, раскрытости проводящих каналов, пространственной ориентировки. В результате в различных частях фильтрационного потока формируются различные потенциальные напоры, которые являются причиной вертикальных перетоков воды по стволу скважины. При этом в скважине устанавливается уровень динамического равновесия, называемый статистическим или естественным уровнем данной водоносной системы. Для каждого отдельного водоносного интервала, локализованного в данном сечении фильтрационного разреза, уровень является динамическим.

В условиях возбуждения скважины откачкой или наливом водопритока или водопоглощения в различных интервалах разреза дополнительно стимулируются градиентом давления, задаваемым на устье.

Расходомерические исследования для целей количественной оценки водопроницаемости пород, залегающих на различных глубинах, предусматривают проведение измерений водопритоков и водопоглощений минимум дважды: в неработающей скважине (при установившемся уровне динамического равновесия) и при возбуждении скважины каким-либо способом. В зависимости от задаваемого режима возбуждения скважины различают две модификации расходомерического каротажа: расходомерический каротаж при установившемся возбуждении скважины; расходомерический каротаж при неустановившемся возбуждении скважины. В обоих случаях основными исходными данными являются расходограммы (графики изменения расхода воды по скважине как функция глубины), полученные в неработающей и работающей скважине; сведения о положении уровня воды в скважине до возбуждения и на стадии возбуждения. В первой модификации интерес представляют конечные значения, во второй — временной ход характеристик работающей скважины. Эти данные позволяют определить реакцию каждой пересеченной скважиной водоносной зоны на приложенное воздействие и применить для обработки экспериментальных данных известные решения о водопитоках в одиночные скважины. При этом делаются допущения, что разрез сложен из сколько угодно большого числа горизонтальных и бесконечных элементарных слоев, в пределах которых имеет место плоскорадиаль-

ная фильтрация воды. Предполагается также, что по характеру вскрытых этих слоев скважина является гидродинамически совершенной. При этих условиях расходограмма может быть представлена как накопительная функция частных дебитов элементарных слоев:

$$q(z) = Q_c - 4\pi \sum_{i=1}^n \frac{k_i s_i(t) \Delta z_i}{\ln(2,25 a_i t / r_0^2)}, \quad (\text{II.21})$$

где $q(z)$ — расход воды по стволу скважины как функция глубины, Q_c — суммарный дебит скважины, равный нулю или заданный постоянным; k_i, a_i — коэффициенты фильтрации и пьезопроводности элементарного слоя мощностью Δz_i ; s_i — действующее понижение (действующий градиент давления), соответствующее данному элементарному слою в момент времени t с начала возбуждения скважины (остановки); r_0 — эффективный радиус скважины; $i=1, 2, \dots, n$ — номера элементарных слоев, отсчитываемых от устья скважины.

В условиях квазистационарного режима, который в одиночной скважине наступает в первые минуты, различия элементарных слоев в разрезе трещиноватых пород по a могут рассматриваться весьма условно. Поэтому правомерно уравнение (II.21) записать в виде

$$q(z) = Q_c - \frac{4\pi}{\ln(2,25 at / r_0^2)} \sum_{i=1}^n k_i s_i(t) \Delta z_i, \quad (\text{II.22})$$

где a — коэффициент пьезопроводности, характеризующий весь разрез.

Для условий установившегося (квазиустановившегося) режима уравнение расходограммы можно записать в виде, эквивалентном (II.22) при замене $R = 1,5\sqrt{at}$:

$$q(z) = Q_c - \frac{2\pi}{\ln(R/r_0)} \sum_{i=1}^n k_i s_i \Delta z_i, \quad (\text{II.23})$$

где R — приведенный радиус влияния скважины.

По форме расходограмм разрез расчленяется на непроницаемые и проницаемые интервалы. Первые соответствуют интервалам расходограммы с нулевым или постоянным расходом ($k_i=0$), вторые — интервалам монотонного изменения расхода. Разность

$$q(z_k) - q(z_n) = Q_j \quad (\text{II.24})$$

определяет величину частного дебита водоносной зоны.

Здесь $q(z_k)$ и $q(z_n)$ — значения расхода потока воды по стволу скважины против кровли и подошвы водоносной зоны; $j=1, 2, \dots, N$ — номера выделенных проницаемых (водоносных) зон.

Методика дальнейшей интерпретации данных расходометри-

ческого каротажа для оценки фильтрационных свойств пород различна для каждой названной модификации.

Оценка коэффициента водопроницаемости пород по данным расходометрического каротажа при установившемся возбуждении скважины. Предварительно необходимо определить положение статических уровней каждой выделенной для рассмотрения водоносной зоны. Такие определения производятся на основании анализа зависимостей дебит водоносной зоны — динамический уровень в скважине. Руководствуясь тем, что достигнутое понижение уровня при установившемся возбуждении водоносного горизонта характеризует суммарную потерю напора при движении воды в породах, околоскважинной зоне, по скважине, экстраполяция этой зависимости до пересечения с осью динамический уровень определит значение статического уровня водоносной зоны H_j . В общем случае указанные зависимости имеют параболический вид. Поэтому для их построения и уверенной экстраполяции необходимо иметь минимум три точки наблюдения. В нашем же распоряжении обычно имеются две точки: одна точка соответствует исследованиям в неработающей скважине, вторая точка — возбужденной скважине. В этом случае для повышения надежности определения статического уровня водоносной зоны целесообразно учесть гидравлические потери в стволе скважины и околоскважинной зоне. На современной стадии разработок оценку указанных гидравлических потерь можно приближенно осуществить по номограммам [21]. В этом случае действующий динамический уровень, характерный для рассматриваемой водоносной зоны, будет

$$h_{dj} = h_d - \Delta h_{ij} - \Delta h_{fj}, \quad (11.25)$$

где h_{dj} — действующий динамический уровень для j -той водоносной зоны; h_d — динамический уровень, измеренный в скважине; Δh_{ij} — величина гидравлических потерь по длине скважины в интервале движения потока, связанного с рассматриваемой водоносной зоной; Δh_{fj} — величина гидравлических потерь на входе в скважину в интервале данной водоносной зоны.

Опыт показывает, что внесение указанных поправок имеет смысл только при большой глубине залегания водоносной зоны, значительных расходах потока по стволу и при оборудовании скважины фильтрами с большими входными сопротивлениями.

От точности определения частных значений H_j в известной мере зависит точность оценки частных коэффициентов фильтрации водоносных зон. Надежность полученных определений H_j может быть проверена по выполнению тождества

$$H_0 \equiv H_p = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{H_j Q_j (H_0)}{H_0 - H_j - \Delta h_j}}{\sum_{j=1}^N \frac{Q_j (H_0)}{H_0 - H_j - \Delta h_j}}, \quad (11.23)$$

где H_0 , H_p — соответственно измеренный и рассчитанный уровни гидродинамического равновесия напоров; $Q_j(H_0)$ — дебит водоносной зоны при уровне воды в скважине, равном H_0 ; N — количество совместно исследуемых водоносных зон; $\Delta h_j = \Delta h_{lj} + \Delta h_{fj}$ (для условий неработающей скважины).

Расчет частных коэффициентов фильтрации водоносных зон k_j производится по формуле

$$k_j = \frac{T s_0}{Q_c (h_{dj} - H_j)} \frac{Q_j}{m_j}, \quad (11.27)$$

где Q_j , m_j — дебит и мощность рассматриваемой водоносной зоны; Q_c — дебит скважины; T — суммарный коэффициент водопроводимости разреза; действующее понижение в скважине

$$s_0 = h_d - H_0 - \Delta h_{lN} - \sum_{j=1}^N \Delta h_j;$$

Δh_{lN} — величина гидравлических потерь по длине скважины.

Коэффициент суммарной водопроводимости разреза T , входящий в формулу (11.27), определяется по кривой восстановления уровня воды в рассматриваемой скважине после снятия возбуждения или по наблюдательным скважинам, вскрывающим тот же разрез. Соответствующие расчетные формулы приведены во многих руководствах [4, 7].

Из формулы (11.27) следует, что k_j прямо пропорциональны Q_j при заданной интенсивности возбуждения гидродинамически совершенной скважины. Приведение реальной скважины к гидродинамически совершенной, как указывалось, может быть сделано пока весьма приближенно. Поэтому для расчета k_j по данным расходометрического каротажа целесообразно использовать значения дебита водоносных зон, полученные при небольших возбуждениях скважины, когда гидравлические потери в скважине и околоскважинной зоне невелики. Поэтому иногда оказывается удобнее рассчитывать k_j по формуле

$$k_j = \frac{Q_j(H_0) \ln(2,25at^*/r_0^2)}{4\pi m_j (H_0 - H_j)}, \quad (11.28)$$

где a/r_0^2 — определяется по кривой восстановления уровня после остановки скважины; t^* — время, прошедшее после остановки скважины к моменту измерения H_0 .

На рис. 23 приведен пример расходометрического каротажа при установившемся возбуждении скважины. Разрез представлен пермскими песчаниками, алевролитами, аргиллитами. Водоносность в основном определяется трещиноватостью этих пород. Скважина пробурена с промывкой забоя чистой водой. Ствол открытый. До глубины 20 м скважина закреплена обсадной трубой. Расходометрический каротаж проведен при восстановленном естественном уровне, равном 2,68 м, и при двух сту-

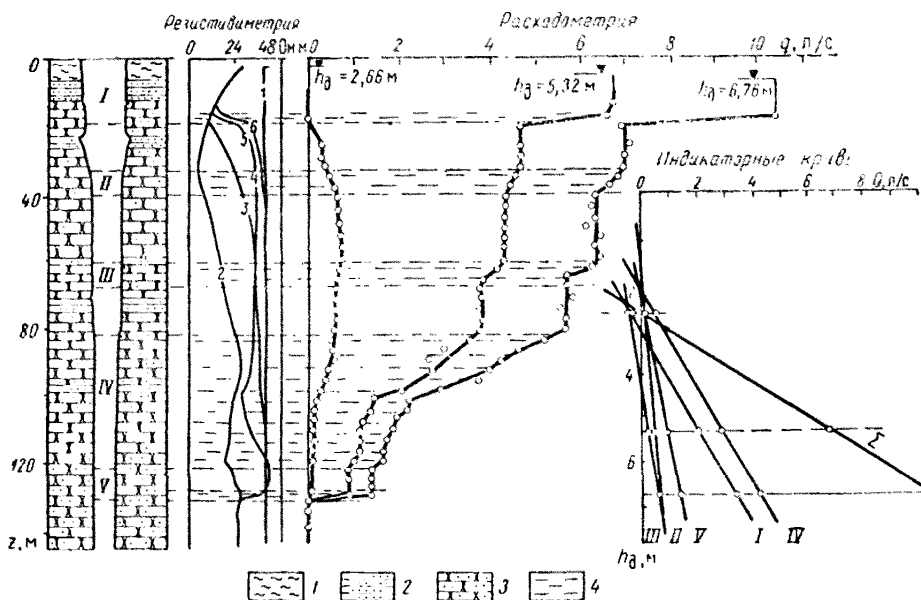


Рис. 23. Пример расходоиметрического каротажа при установившемся возбуждении скважины.

1 — суглинок; 2 — алевролит; 3 — песчаник; 4 — водоносные зоны.
Водоносные зоны: I— $H_1=3,04$ м, $k_1=11,5$ м/сут; II— $H_2=4,15$ м, $k_2=2,34$; III— $H_3=1,9$ м, $k_3=2,34$; IV— $H_4=2,15$ м, $k_4=3,1$; V— $H_5=2,35$ м, $k_5=16,4$ м/сут. Σ — индикаторная кривая для всей скважины, $H_p=2,65$ м, $k_\Sigma=4,63$ м/сут. 1—6—порядковые номера резистивиграмм.

пенях дебита с установившимися динамическими уровнями $h_d=5,32$ и $6,76$ м. На рисунке кроме расходограмм приведены индикаторные кривые $h_d=f(Q_i)$ для выделенных зон трещиноватости.

Расходоиметрические исследования в изложенной модификации обычно производятся на конечном этапе опытной откачки воды из скважины. Такие откачки обычно производятся на две ступени дебита. Если конструкция и глубина погружения водоприемников позволяет, расходоиметрические измерения осуществляют на каждой из них. В иных случаях — при меньшем дебите, когда весь разрез скважины доступен для наблюдения за водоприитоками.

К недостаткам данной модификации расходоиметрического каротажа следует, видимо, отнести обусловленность точности оценки водопроницаемости различных интервалов разреза точностью определения частных статических уровней на основании ограниченного числа точек наблюдения. Кроме того, при исследованиях по этой модификации возникает необходимость длительного возбуждения скважины, нежелательного при автономном проведении расходоиметрических работ.

Оценка коэффициента водопроницаемости пород по данным расходометрического каротажа при неустановившемся возбуждении скважины. Оценка коэффициента водопроницаемости выделенных водоносных зон осуществляется на основании известного уравнения Тейса.

Для случая совместного исследования нескольких водоносных зон начальными условиями являются:

$$Q_j = Q'_j \text{ при } t = 0;$$

$$Q_j = \dot{Q}_j \text{ при } t > 0,$$

где Q'_j — дебит водоносной зоны до возбуждения скважины, в частном случае при равенстве статических уровней Q'_j может быть равно нулю; \dot{Q}_j — дебит водоносной зоны при возбуждении скважины; t — время, отсчитываемое с начала возбуждения скважины.

При указанных начальных условиях уравнение Тейса для каждой опробуемой зоны можно записать в виде

$$s_j(t) - (H_0 - H_j) = \frac{Q''_j - Q'_j}{4\pi k_j m_j} \left[-E_i \left(-\frac{r_0^2}{4a_j t} \right) \right], \quad (11.29)$$

где $s_j(t)$ — действующее понижение для данной водоносной зоны на стадии возбуждения как функция времени; E_i — интегральная показательная функция.

Для случая исследования одиночной скважины уравнение (11.29) уже на малых временах приводится к виду

$$s_j(t) - (H_0 - H_j) = \frac{0,183 (Q''_j - Q'_j)}{k_j m_j} \lg \frac{2,25 a_j t}{r_0^2}. \quad (11.30)$$

Уравнение (11.30) представляет собой прямую линию в координатах $s_j - \lg t$ с угловым коэффициентом, пропорциональным $k_j m_j$.

Непосредственно из опыта получаются лишь значения H_0 , Q'_j , Q''_j и $h_d(t)$, поэтому осуществить построение графика в координатах $s_j - \lg t$ невозможно. Однако априори можно считать H_j , Δh_{lj} , Δh_{fj} при наступлении квазистационарного режима постоянными во времени и осуществить построение графика в координатах $h_d - \lg t$. Это соответствует смещению графика $s_j - \lg t$ параллельно самому себе вдоль оси s_j на величину $H_j + \Delta h_{lj} + \Delta h_{fj}$ и не повлияет на оценку величины $k_j m_j$.

Левая часть уравнения (11.30) может быть выражена в виде суммы

$$s_j(t) - (H_0 - H_j) = s_0(t) - \Delta h_{lj} - \Delta h_{fj}, \quad (11.31)$$

где $s_0(t) = h_d(t) - H_0$, что дает основание для построения аналогичного графика в координатах $s_0 - \lg t$ с тем же параметром $k_j m_j$.

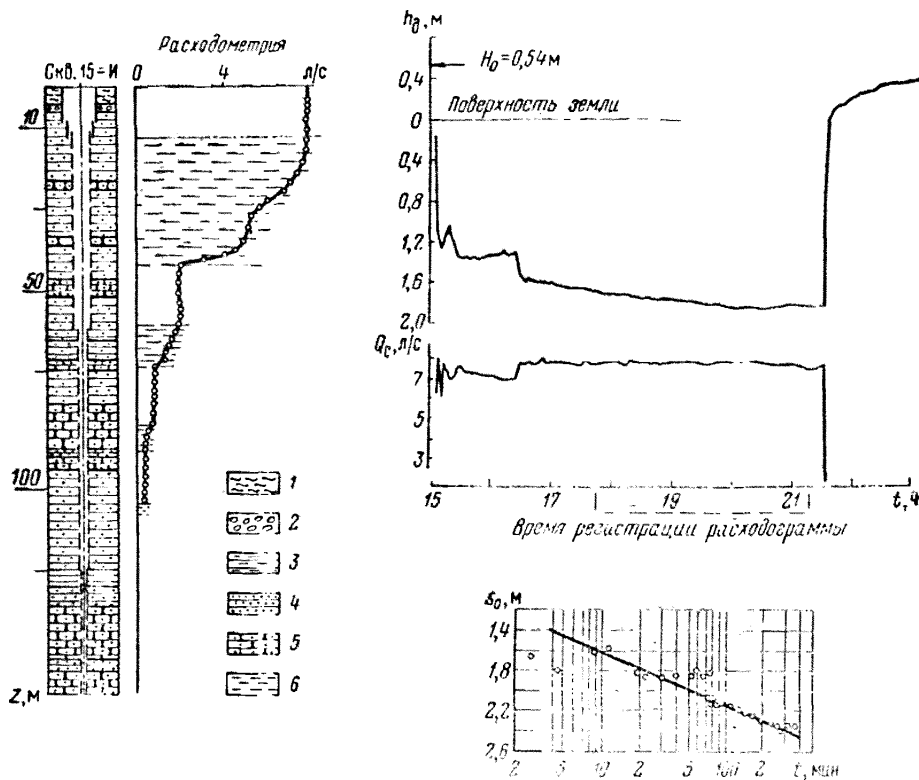


Рис. 24. Пример расходомерического каротажа при неустановившемся возбуждении скважины.

1 — суглинок; 2 — гравийно-галечниковые отложения; 3 — аргиллит; 4 — алевролит; 5 — песчаник; 6 — водоносные зоны

$$k_j m_j = 0,183 (Q_j'' - Q_j')/C, \quad (11.32)$$

где C — угловой коэффициент графика $s_0 - \lg t$.

Данная модификация расходомерического каротажа требует меньше времени и, видимо, более точная. Однако необходимо подчеркнуть, что оценку $k_j m_j$ по этой методике на современном этапе можно осуществлять только по слоям, ограниченным в разрезе данной скважины непроницаемыми породами.

На рис. 24 показан пример расходомерического исследования при неустановившемся возбуждении скважины.

Сравнение данных расходомерического каротажа с данными опробования трещиноватых разрезов поинтервальными пробными и опытными откачками показало, что расхождения имеют симметричное распределение, а их величина в основном определяется погрешностью измерения. Таким образом, можно ут-

верждать, что достоверность оценки коэффициента водопроницаемости по расходометрическому каротажу соответствует достоверности оценки по одиночным опытно-фильтрационным откачкам или наливам.

На практике перед исследованием одиночных скважин часто ставится задача получения только сравнительных фильтрационных характеристик. Поэтому данные расходометрического каротажа в этом случае можно представлять в виде относительных величин распределения фильтрационных свойств в долях единицы (за единицу принимается водопроницаемость всего разреза).

В дальнейшем при массовой обработке результатов исследования скважин, пробуренных на месторождении в пределах одного горизонта, можно при необходимости перейти к абсолютным значениям фильтрационных свойств, приняв за единицу значение водопроницаемости, полученное по данным мощной кустовой откачки, захватывающей все рассматриваемые скважины на месторождении. Этот прием позволяет исключить случайные ошибки, обусловленные гидравлическими особенностями различных скважин, но в то же время сгладит и различия, обусловленные плановой неоднородностью месторождения.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ РАЗЛИЧНЫХ ГОРИЗОНТОВ

В условиях локальной обводненности разреза, вызванной фациальной изменчивостью состава и неравномерной трещиноватостью пород, различными структурными и тектоническими причинами, нередко представляет интерес вопрос о степени взаимосвязи между водоносными зонами и горизонтами, вскрытыми как одной скважиной, так и несколькими в разных точках на разведываемой площади. Потребность в решении такой задачи возникает в исследованиях, направленных на изучение условий формирования подземных вод, их питания и транзита, характера циркуляции в пространстве. Также интересным является представление об условиях водопритока к водозаборным скважинам. Опыт показывает, что в трещиноватых и закарстованных породах пространственное распределение водопритоков далеко от радиального и плоского.

Для выявления взаимосвязи различных горизонтов и зон в настоящее время эффективно используются данные метода расходометрического каротажа, а в последнее время проведены удачные эксперименты использования данных термометрического каротажа (Урал, Украина). Использование расходометрического каротажа для указанных целей предполагает проведение исследований в скважине, реагирующей на откачку воды из соседней скважины. Обычно такие работы проводятся в наблюдательных скважинах опытных кустов. Соответствующая модификация расходометрического каротажа называется расхо-

метрическим каротажем реагирующих (наблюдательных) скважин.

Методика исследования в общем случае предусматривает изучение изменения перетоков по стволу реагирующей скважины в связи с возбуждением возмущающей (соседней) скважины на одно или несколько понижений уровня в квазистационарном режиме. При этом имеется в виду, что эти реагирующие скважины уже исследованы или будут исследованы по методике расходометрического каротажа одиночных скважин, изложенной в предыдущем разделе. На основании полученного материала может быть дана оценка величины срезки от статического уровня каждого водоносного горизонта (зоны) в реагирующей скважине, образуемой откачкой из возмущающей скважины. Сопоставление величин срезов по различным горизонтам может служить сравнительной характеристикой фильтрационной связи водоносных горизонтов с возмущающей скважиной. Дальнейшее гидрогеологическое истолкование этих данных определяется конкретными условиями района и задачами проводимых исследований.

В связи с тем, что указанные исследования в последнее время приобретают все более широкий характер и интерес, рассмотрим гидродинамическую обстановку, складывающуюся в результате взаимодействия скважин.

При откачке воды вокруг возмущающей скважины образуется депрессионная воронка, контуры которой определяют область питания возмущающей скважины. Поверхность депрессионной воронки определяет уровни напоров подземных вод во время откачки в различных точках в пределах области питания возмущающей скважины. Приведенный радиус воронки наряду с другими факторами определяется фильтрационными свойствами пород. По Дюпюи он может быть выражен уравнением

$$\ln R = (2\pi kms/Q_c) + \ln r_0, \quad (II.33)$$

где R — приведенный радиус влияния откачки; k — коэффициент фильтрации; m — мощность водоносных пород; Q_c — дебит скважины; r_0 — радиус возмущающей скважины; s — понижение уровня в возмущающей скважине.

Приведенный радиус влияния может быть выражен в виде

$$R = 1,5 \sqrt{at} = 1,5 \sqrt{kmt/\mu}, \quad (II.34)$$

где μ — водоотдача пород; t — продолжительность возбуждения возмущающей скважины.

Если реагирующей скважиной вскрыта одна водоносная зона, в скважине устанавливается уровень, соответствующий статическому уровню этой зоны. При откачке воды из возмущающей скважины при наличии гидравлической связи по этой зоне произойдет снижение уровня в реагирующей скважине. Высота

нового уровня соответствует образованному действием откачки динамическому уровню. Разность между статическим и динамическим уровнями определит величину срезки, обусловленную дебитом, продолжительностью откачки, расстоянием между скважинами, фильтрационными свойствами пород. Образование срезки является необходимым и достаточным признаком гидравлической связи между скважинами.

Из уравнения (II.33) видно, что если коэффициент фильтрации равен нулю, то радиус влияния откачки будет равен радиусу возмущающей скважины. Иными словами, если водоносная зона, вскрытая наблюдательной скважиной, не имеет связи с возмущающей, т. е. притока воды к возмущающей скважине из этой зоны не происходит, то влияние откачки не отразится на положении ее статического уровня¹. Из уравнений (II.33) и (II.34) также следует, что чем лучше водопроводимость пород в направлении к возмущающей скважине, тем больше радиус влияния откачки и тем ниже будет динамический уровень при равных статических напорах, расстоянии и пр.

Рассмотрим гидродинамическую обстановку, складывающуюся в реагирующей скважине, вскрывшей разрез с несколькими водоносными зонами. Уже отмечалось, что в этих условиях устанавливающийся в скважине уровень воды при отсутствии каких-либо возмущений в пределах области влияния соответствует состоянию динамического равновесия этой водоносной разнотерпной системы. Его положение в скважине поддерживается устанавливающимися по стволу перетоками воды из одних зон в другие. Водоносные зоны, у которых статический уровень расположен выше уровня гидродинамического равновесия, отдают воду в скважину, зоны, у которых статический уровень расположен ниже, — поглощают. Этот уровень условно будем называть уровнем динамического равновесия первой генерации $H_0^{(1)}$.

При откачке воды из возмущающей скважины вследствие гидравлической связи и образования депрессионной воронки в реагирующей скважине установится новый уровень, который будет ниже первоначального уравнивающего уровня первой генерации. Характерно, что снижение уровня воды в реагирующей скважине не сопровождается необходимостью отбора воды на поверхность. Если этот уровень до откачки рассматривался как уравнивающий, то в новых условиях ему, видимо, тоже можно приписать данное свойство. Этот новый уравнивающий уровень будем называть уровнем динамического равновесия второй генерации $H_0^{(2)}$ и т. д.

¹ Фактическое отсутствие срезки можно объяснить также тем, что радиус влияния при заданной интенсивности откачки и ее продолжительности оказывается меньше расстояния между скважинами.

Рассмотрим такой гипотетический пример. Наблюдательная скважина вскрывает две водоносные зоны с разными статическими уровнями. При установившемся уровне динамического равновесия H_0^1 по стволу происходит переток воды из одной зоны в другую. Допустим также, что одна из водоносных зон, например отдающая, заведомо не связана с опытной скважиной, но при откачке из возмущающей скважины уровень в реагирующей скважине снижается. В связи с тем, что отдающая зона не имеет связи с возмущающей скважиной, срезки от ее статического уровня не произойдет и в соответствии со снижением уровня должно наблюдаться увеличение притока воды в скважину. А так как уровень воды в реагирующей скважине соответствует состоянию динамического равновесия, то эта вода должна быть полностью поглощена второй зоной, т. е. получается, что одновременно со снижением видимого уровня воды в реагирующей скважине происходит увеличение поглощения во второй зоне. Очевидно, что для приведения этого явления в соответствие с действием закона Дюпюи, нужно предположить образование срезки от статического уровня второй зоны, что одновременно свидетельствует о существовании фильтрационной связи этой зоны с опытной скважиной. Если нанести значение дебита водоносной зоны, полученное во время откачки воды из возмущающей скважины, на индикаторную кривую (зависимость дебит — динамический уровень, полученная при исследовании реагирующей скважины как одиночной) этой зоны, наблюдаемая точка ($Q_f^{(2)}, H_0^{(2)}$) расположится под индикаторной кривой. Для зоны, не имеющей гидравлической связи с возмущающей скважиной, данная точка попадает на индикаторную кривую. Указанное является общим правилом решения задачи об установлении факта гидравлической связи между водоносными зонами, вскрытыми реагирующей и возмущающей скважинами. На основании этих же данных можно получить величину образованной срезки от статического уровня каждой зоны.

Исследование пар скважин по описанной методике производится следующим образом. До начала возбуждения возмущающей скважины регистрируется расходограмма в реагирующей скважине. По этой расходограмме определяют дебиты всех взаимодействующих по стволу водоносных зон. Во время возбуждения возмущающей скважины в период установления стационарного (квазистационарного) режима производят повторную регистрацию расходограммы в реагирующей скважине, по которой также определяют величину дебитов взаимодействующих по стволу водоносных зон. Одновременно фиксируют положение уровня воды в реагирующей скважине. При возбуждении на несколько понижений расходометрические наблюдения повторяются. Если скважина эта была предварительно исследована как одиночная, шаг измерения расходов по стволу может быть раз-
режен, поскольку исходным материалом для дальнейшей ин-

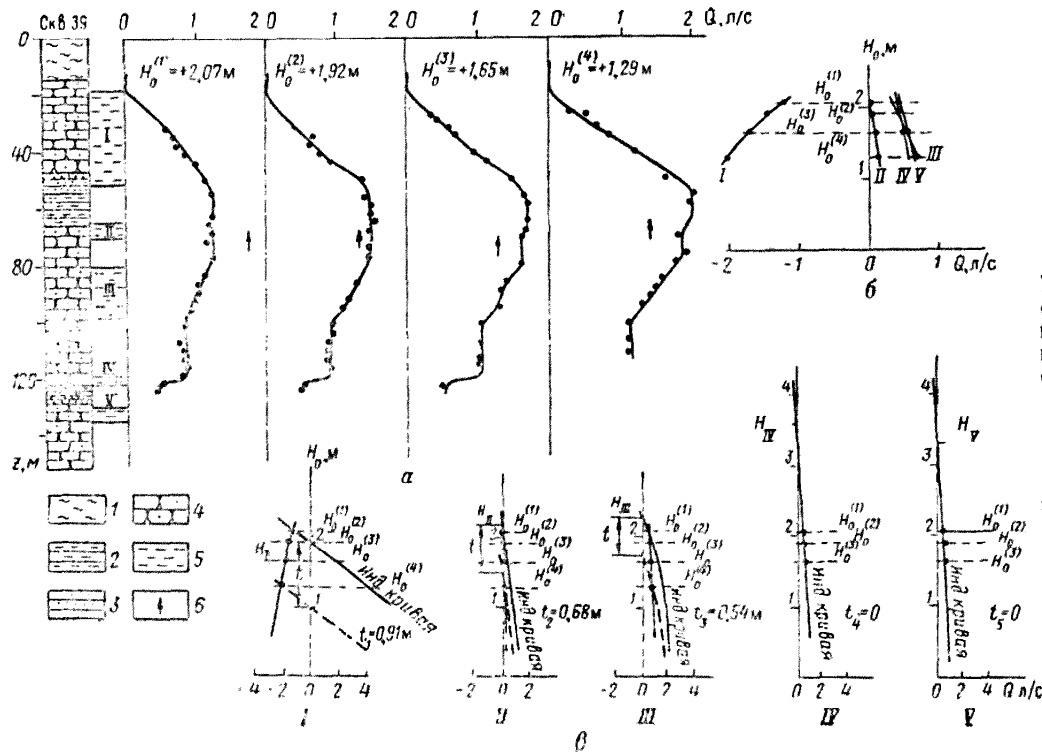


Рис. 25. Расходомерные исследования в реагирующей скв. 39 при откачке из возмущающей скв. 41 на несколько понижений.

а — расходограммы при естественном уровне и различных ступенях его снижения, вызванных откачкой из скв. 41; *б* — зависимости дебит водоносных зон — динамический уровень в условиях реагирования; *в* — нахождение срезов от статических уровней водоносных зон I—V.

1 — суглинки; 2 — аргиллит; 3 — алевролит; 4 — песчаник; 5 — водоносные зоны (I—V); 6 — направление перетока по столу

терпретации являются дебиты водоносных зон и положение уровня воды.

Для определения величин срезок от статического уровня каждой водоносной зоны в реагирующей скважине, образованных откачкой воды из возмущающей скважины, поступают следующим образом. На график индикаторной кривой соответствующей зоны наносят точку с координатами $Q_j^{(2)}, H_0^{(2)}$. Величина $O_j^{(2)}$ соответствует дебиту j -той водоносной зоны при уровне воды в скважине $H_0^{(2)}$. Считая, что величина удельного дебита водоносной зоны является характеристикой, не зависящей от высоты статического уровня, через наблюденную точку $Q_j^{(2)}, H_0^{(2)}$ можно провести линию, параллельную ранее построенной индикаторной кривой. Эта линия будет той же индикаторной кривой, но в условиях срезки от статического уровня рассматриваемой зоны. Отрезок t на оси ординат определит величину образованной срезки. Если с момента получения индикаторной кривой до момента исследований уровень подземных вод претерпел некоторые изменения (сезонные колебания, дренаж и т. д.), в эту кривую предварительно нужно внести коррекцию на изменение условий. Для этого используются значения $Q_j^{(1)}, H_0^{(1)}$.

На рис. 25 приведен пример таких исследований и результаты определения величин срезок. Реагирующая скв. 39 расположена в 200 м от возмущающей скв. 41 (месторождение Красноярские песчаники, Кемеровская обл.). Водоносные зоны связаны с интервалами трещиноватых пород песчано-алевролитового состава. Исследования в скв. 39 производились при установившемся естественном уровне $H_0^{(1)}$ и трех понижениях при откачке воды из скв. 41. Характер изменения водообмена между водоносными зонами в скв. 39 при различных возбуждениях показан на рис. 25 расходограммами и кривыми изменения частных дебитов. Сравнение кривых изменения частных дебитов с индикаторными кривыми показывает, что для трех верхних зон наблюденные точки $Q_j^{(2)}, H_0^{(2)}$ и т. д. располагаются под индикаторной кривой. Величины образованных срезок при максимальном понижении для них соответственно равны 0,91, 0,68, 0,54 м. Для каждой из двух нижних зон кривая изменения частных дебитов совпадает с индикаторной кривой, что указывает на отсутствие связи этих зон с возмущающей скв. 41.

При отсутствии индикаторных кривых для проведения такого анализа наличие гидравлической связи водоносных зон в реагирующей скважине с возмущающей приближенно может быть установлено непосредственно из анализа кривых изменения частных дебитов, руководствуясь следующим правилом. Если одновременно со снижением видимого уровня воды в реагирующей скважине при откачке из возмущающей дебит водоносной зоны уменьшается (или становится отрицательным), это свидетельствует о наличии хорошей гидравлической связи соответ-

вующей зоны с возмущающей скважиной. При противоположном направлении изменения частных дебитов суждение о наличии гидравлической связи становится неоднозначным.

Для успешного проведения исследования описанным методом необходимо, чтобы по стволу реагирующей скважины происходили перетоки, доступные измерению с помощью расходомеров, а также, чтобы возбуждение возмущающей скважины было достаточным для вовлечения реагирующей в сферу влияния возмущающей.

Аналогичные исследования могут быть осуществлены с использованием резистивиметрии, хотя с несколько меньшей достоверностью выводов, связанной с трудностью интерпретации резистивиграмм. Соответствующий пример совместного использования этих методов в указанной постановке приведен на рис. 26.

Реагирующая скв. 14 расположена в 5 м от возмущающей скв. 14-ц. Разрез представлен конгломератовой толщей с редкими включениями пачек песчанников и гравелитов. В разрезе скв. 14 выделяется пять водоносных зон различной активности. При установившемся динамическом равновесии наблюдается активный приток воды в скважину из зоны в границах 17—27 м и зоны, расположенной на глубинах 168—182 м, с дебитом соответственно 1,06 и 0,44 л/с. Этот суммарный приток, перетекая по скважине, поглощается в интервале 133—149 м. Зоны в интервалах 68—71 и 84—89 м в водообмене участвуют весьма пассивно. Характерно, что качественная картина водообмена между водоносными зонами в течение двухлетнего наблюдения оставалась неизменной.

При откачке из скв. 14-ц произошло перераспределение напоров, активизируются зоны 68—71 и 84—89 м, резко меняется характер водообмена между водоносными зонами по стволу. Ранее поглощавшая воду зона 133—149 м образует интенсивный приток воды, которая, перетекая по скважине вверх, поглощается зонами 68—71 и 84—89 м. Верхняя зона 17—27 м выключается из водообмена с остальными и проявляется как горизонтальный поток.

Сопоставляя величины водообмена между водоносными зонами при различных условиях, легко заметить следующее. Три верхние водоносные зоны с увеличением понижения уровня воды в скв. 14-ц и соответственным снижением уровня в скв. 14 уменьшают величину водопритока в скважину вплоть до перемены знака, т. е. становятся поглощающими, а зона 133—149 м в соответствии со снижением того же уровня увеличивает водоприток. О самой нижней зоне трудно говорить определенно, так как она находится ниже фактического забоя и, вполне вероятно, оказалась изолированной от остальных оседающим шламом. Из анализа этих данных можно заключить, что несомненно все

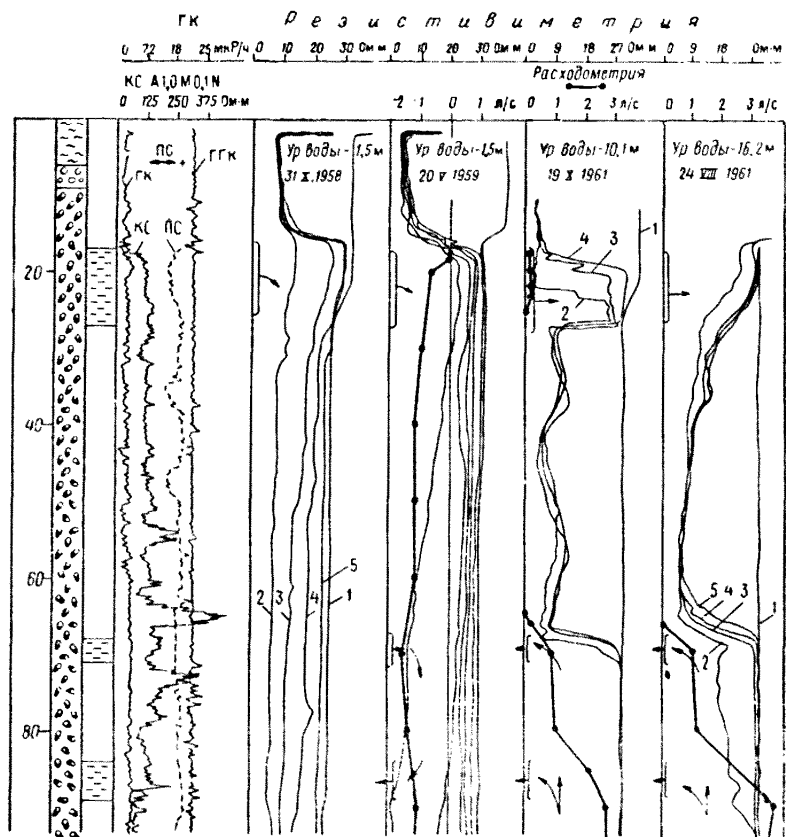
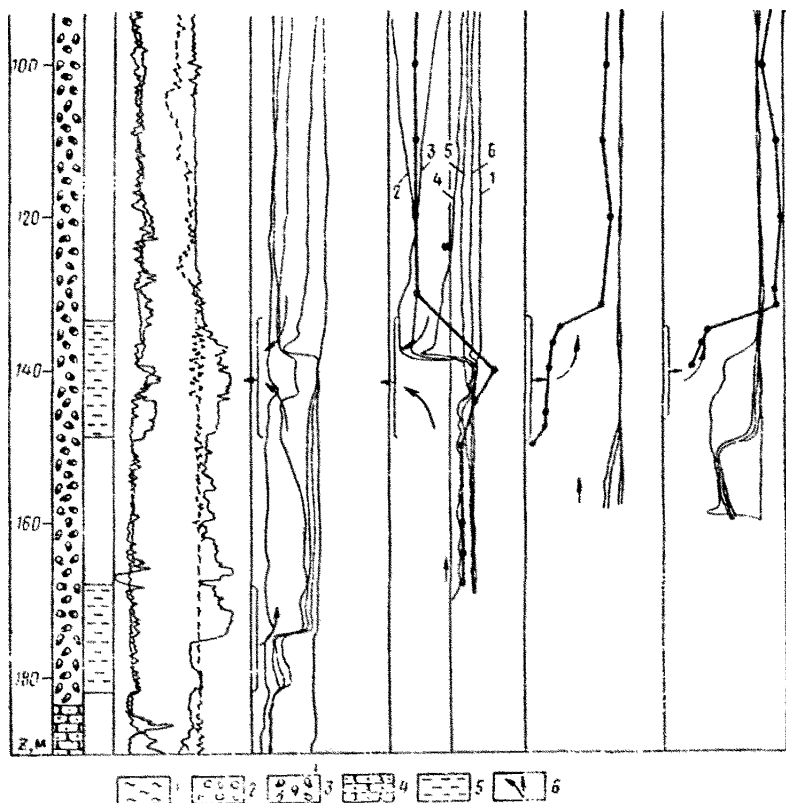


Рис. 26. Пример исследования реагирующей скважины методами расходо-скважины 14-ц: 19/X 1961 г. с $s=6,4$ м, $Q=40$ л/с; 24/VIII 1961 г. 1 — суглинок; 2 — гравеллит; 3 — конгломерат; 4 — песчаник мелкозернистый; 5 — водонос-резистивная зона.

зоны связаны со скв. 14-ц, однако лучшая фильтрационная связь, очевидно, характерна для трех верхних зон.

Анализ результатов подобных исследований во многих районах развития трещинных вод показывает, что принимаемое в расчетах допущение о плоскорадиальной фильтрации воды к водозаборным сооружениям является в известной мере условным. Иногда при рассмотрении условий водопитока к реальным эксплуатационным скважинам такие данные могут явиться дополнительным аргументом при выборе величины допустимого понижения или при суждении об области преимущественного притока воды к водозабору.

Особую ценность результаты исследования реагирующих скважин могут приобрести при выяснении взаимосвязи вод раз-



метрии и резистивиметрии. Расходомерия проведена при откачке воды из $s=11,51$ м, $Q=60$ л/с.

ные зоны; б — направления перетоков воды по стволу скважины; 1—6—порядковые номера

личных стратиграфических горизонтов или гидродинамических зон. Ниже приводится пример анализа данных каротажа для обоснования условий формирования подземных вод, в котором именно эти исследования явились наиболее убедительным аргументом при выборе варианта схематизации гидрогеологической обстановки.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ КАРТАЖА ДЛЯ АНАЛИЗА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Характеристика типа коллектора

Представление о структуре пустотного пространства пород-коллекторов позволяет качественно судить о характере и интен-

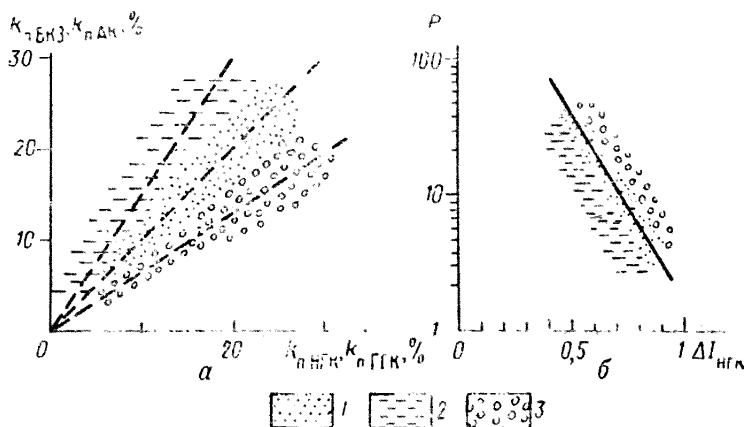


Рис. 27. Зависимости между физическими свойствами коллекторов с различным типом порового пространства и соответствующие им области расположения экспериментальных точек (по В. Н. Дахинову).

а — области расположения значений $k_{пгк}$, определенных методами БКЗ, АК, НГК и ГГК для пород с различным типом пористости; *б* — зависимость $P=f(\Delta I_{ггк})$.
1 — коллекторы с межзерновым и близким к нему типом пористости; *2* — то же, с анизотропно-трещиноватой пористостью; *3* — то же, с кавернозной пористостью

сивности циркуляции подземных вод, их роли в геологической жизни породы. Использование данных каротажа при решении этой задачи носит вероятностный характер, т. е. суждение о том или ином преобладающем типе пустотного пространства делается на основе более или менее аргументированных предположений. В связи с этим необходимо располагать информацией, имеющей различную физическую природу.

Применяемым часто приемом качественного анализа типов коллекторов является согласование геологических, гидрогеологических и геофизических факторов. Например, выявление по данным каротажа (ГГК-П, АК, резистивиметрия, расходомерия и др.) узколокализованных водоносных зон с границами, несовпадающими с геологическими, с большей степенью вероятности свидетельствует о трещинной природе этих зон (в терригенном разрезе) и, возможно, также карстовой (в карбонатном разрезе). Если дополнительно к этому фиксируются большие скорости фильтрации (по данным резистивиметрии) или большие значения коэффициента фильтрации (по данным расходомерии), этот вывод является несомненным. Возможен случай, когда коллектор, выделенный по данным каротажа, подстилается и перекрывается вязкими породами, т. е. полностью совпадает с геологическими границами. Критерием отнесения его к трещинному в этом случае может быть наличие резкой расчлененности кривых сопротивления (микрозондирование при бурении скважины с глинистой промывкой), изменчивость диамет-

ра скважины (по кавернограмме), большие скорости фильтрации (по данным резистивиметрии) большие значения коэффициента фильтрации (по данным расходоиметрии).

В каждом отдельном случае качественные критерии отнесения коллектора к тому или иному типу могут быть различными. Это зависит от геологических условий и применяемого комплекса методов [55].

Кроме качественных признаков характера водоносности отложений могут быть использованы количественные критерии. По данным различных исследований [3, 48, 72, 76] в качестве таких критериев можно использовать следующие признаки. Для коллектора межзернового типа характерны равные (в пределах точности) и высокие значения пористости, оцененные по данным НГК и БКЗ (формулы Арчи, Дахнова) (рис. 27, а). Этот критерий справедлив в пределах справедливости указанных методов. При построении зависимости $P = \rho_{\text{п}}/\rho_{\text{в}} = f(\Delta I_{\text{НГК}})$ по массовым определениям точки с координатами P и $\Delta I_{\text{НГК}}$ располагаются достаточно близко к ней (рис. 27, б).

Для коллектора трещинного типа характерно превышение значений $k_{\text{п}}$, определенных по БКЗ или АК, над значениями $k_{\text{д}}$, определенными по данным НГК или ГГК-П. Между этими значениями могут наблюдаться расхождения, достигающие — 2—3-кратных величин (см. рис. 27, а). При построении зависимости $P = f(\Delta I_{\text{НГК}})$ по массовым определениям в коллекторах различного типа точки с координатами P и $\Delta I_{\text{НГК}}$ тяготеют к нижней области этой зависимости (см. рис. 27, б).

Для коллекторов с преобладанием кавернозной пористости с затрудненным сообщением между отдельными каверными характерно снижение значений $k_{\text{п}}$, определенных по БКЗ или АК, по сравнению со значениями $k_{\text{п}}$, определенными по данным НГК или ГГК-П (см. рис. 27, а). На зависимости $P = f(\Delta I_{\text{НГК}})$, построенной по массовым определениям в коллекторах различного типа, точки с координатами P и $\Delta I_{\text{НГК}}$ тяготеют к верхней области распределения значений (см. рис. 27, б).

Потребность в привлечении геофизических признаков типов коллекторов может быть различной в зависимости от представительности кернового материала или других объективных источников информации.

Изучение структуры коллекторов

Привлечение данных каротажа, особенно в гидрогеологических исследованиях на месторождениях твердых полезных ископаемых, в связи с возможностью проведения объективной геологической корреляции разрезов и плановых построений по большому числу точек позволит изучать пространственную изменчивость коллекторов. В связи с этим целесообразно рассмот-

реть возможности использования некоторых количественных геофизических характеристик изменчивости структуры пород.

Использование структурного коэффициента

Как известно, величина электрического сопротивления пород помимо прочих факторов определяется формой порового пространства, его неравномерностью, извилистостью. Влияние этих факторов на величину электрического, а следовательно, и относительного сопротивления принято характеризовать так называемым структурным коэффициентом, равным отношению относительного сопротивления реальной породы к относительному сопротивлению породы с идеальной укладкой зерен шарообразной или кубической формы [73]. Если принять влияние формы порового пространства несцементированных песков на величину их сопротивления за единицу, то для прочносцементированных песчаников и алевролитов величина структурного коэффициента возрастает до 3—20, а для карбонатных пород типа известняков и доломитов до 12—100 [66]. Таким образом, только благодаря различной геометрии проводящих каналов сопротивление породы может измениться более чем на порядок.

Основываясь на указанной обусловленности электрического сопротивления пород, можно прибегнуть к построению карт значений структурного коэффициента и сопоставить их с геологической основой. Они могут дополнительно характеризовать изменчивость геологических и гидрогеологических условий. Для этого на образцах керна определяется значение относительного сопротивления блока породы, принимаемое за единицу. Такие определения могут быть сделаны в нескольких точках на площади для получения средней величины. Структурный коэффициент определяется затем как отношение прочих значений относительного сопротивления к полученным средним значениям относительного сопротивления блоковой части породы.

Использование статистических показателей электрического сопротивления пород

Очевидно также, что при равных значениях общей пористости и минерализации вод против трещиноватых, кавернозных карбонатов будут наблюдаться более изрезанные графики сопротивления, чем против монолитных разностей. Неоднородность показаний электрического сопротивления будет тем больше, чем большей неоднородностью порового пространства будет обладать рассматриваемая порода. Имеется в виду неоднородность не только с точки зрения количества трещин или каверн на единицу мощности, но и неоднородность их форм и пространственной ориентировки. Неоднородность электрического сопротивления в пределах рассматриваемой толщи может быть выражена

в статистических показателях, таких, как коэффициент вариации, дисперсия и т. п. Эти показатели также могут быть сопоставлены с геологической основой для изучения изменчивости коллекторских свойств.

Использование электрической анизотропии

Между электропроводностью и водопроницаемостью пород в первом приближении может быть установлена аналогия. Это позволяет отождествлять наблюдаемую по данным электрокаротажа электрическую анизотропию пород с анизотропией их фильтрационных свойств [77].

Электрическая анизотропия по данным каротажа оценивается по формуле

$$\lambda = \sqrt{\rho_t/\rho_l}, \quad (II.35)$$

$$\rho_t = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \rho_i}{\sum_{i=1}^n h_i}, \quad \rho_l = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n (h_i/\rho_i)},$$

где λ — коэффициент электрической анизотропии; ρ_t , ρ_l — соответственно поперечное и продольное сопротивление рассматриваемой толщи; ρ_i , h_i — соответственно сопротивление и мощность элементарных слоев в пределах толщи; $i=1, 2, \dots, n$ — количество слоев, на которое разделена мощность данной толщи.

Представление изменения коэффициента электрической анизотропии в виде карты, совмещенной с геологической и гидрогеологической основой, также может дать материал для суждения об изменчивости характеристики коллектора.

Использование структурного показателя

Связь между пористостью гранулярных коллекторов и сопротивлением обычно выражают формулой Арчи

$$P = \rho_n/\rho_v = 1/k_{гр}^m. \quad (II.36)$$

Не углубляясь в анализ формулы, отметим лишь, что по значению $k_{гр}$, определенному по керну блоковой части породы, ρ_n по данным каротажа и ρ_v (любой способ оценки) можно получить оценку некоторого значения показателя m , соответствующего фиктивной породе с пористостью, удовлетворяющей этой формуле. Лишь для однородной среды значение m будет соответствовать истинному. Таким образом представляется возможным изучать изменчивость структурных особенностей пород, изучая изменчивость фиктивного значения m . Указанное будет справедливо лишь при условии постоянства минерализации подземных вод.

При исследованиях на месторождениях в связи с изучением и оценкой возможных водопритоков может возникнуть потребность в детальной характеристике фильтрационного потока в различных его сечениях или в обобщенном представлении характера водоносности отложений всего месторождения. Постановка таких задач может быть обусловлена определенным расположением горных выработок, необходимостью перехвата подземного стока, выявлением связи подземных и поверхностных вод, расчетом глубин заложения водопонижительных и эксплуатационных скважин, а также оценкой допустимого понижения и т. д.

Фильтрационные разрезы

Прямыми характеристиками фильтрационного потока, как известно, можно считать коэффициент фильтрации, скорость фильтрации и температуру. Все эти показатели могут быть по-

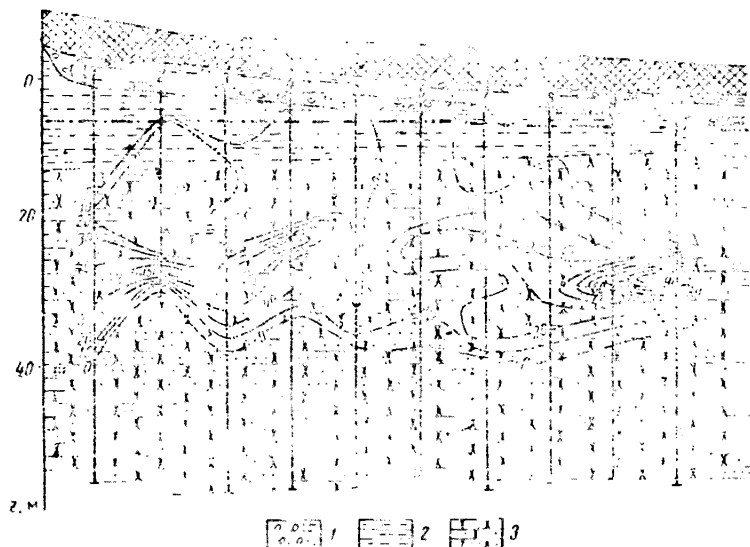


Рис. 28. Фильтрационный разрез по данным резистивиметрического каротажа скважин в районе Братской ГЭС [35].

1 — гравийно-галечниковые отложения; 2 — аргиллиты; 3 — песчаники. D_1 — D_{10} —скважины из дренажной галереи. Шифр кривых — скорость фильтрации в м/сут

лучены по данным соответствующих методов каротажа и представлены в виде разрезов в изолиниях, совмещенных с геологической основой.

Информационная емкость этих построений неодинакова. Разрезы, характеризующие изменения коэффициента фильтрации

пород, отражают потенциальную транзитную способность различных интервалов разреза. Разрезы скоростей фильтрации отражают фактическое распределение и интенсивность фильтрационного потока в конкретной гидродинамической обстановке. Наконец, разрезы распределения температур в ряде случаев могут характеризовать источники формирования подземного потока в естественном и нарушенном режиме. К сожалению, опыт такого применения термокаротажа пока еще не велик. В связи с освоением выпуска высокочувствительных электротермометров эти исследования, видимо, будут применяться шире.

Указанные исследования и построения при современном опыте работ следует, видимо, применять только на месторождениях, гидрогеологический разрез которых представляет собой единый водоносный комплекс.

На рис. 28 показан пример построения фильтрационного разреза по данным резистивиметрического каротажа в районе Братской ГЭС в связи с выяснением фильтрации из водохранилища [35]. Этот разрез показал, что фильтрация подземных вод происходит в виде нескольких концентрированных потоков, и позволил более обоснованно подойти к принятию соответствующих инженерных решений.

Обобщенные фильтрационные характеристики месторождений

В сложных гидрогеологических условиях результаты исследования каждой отдельной скважины в известной мере соответствуют случайному сечению фильтрационного поля месторождения. Это особенно относится к месторождениям трещинно-карстового типа.

Обобщенное представление о фильтрационной неоднородности вертикального разреза разведываемого месторождения может быть получено только по совокупности исследованных скважин. Наиболее представительными для этой цели являются результаты расходометрического каротажа. Для получения обобщенных характеристик водоносности разреза может рассматриваться совокупность скважин по всему району исследования, по отдельным блокам или профилям. В зависимости от конкретных геологических и гидрогеологических условий, а также целевого назначения обобщенных характеристик профили водопроницаемости разрезов скважин сопоставляются по глубине, положению уровня подземных вод или стратиграфическим границам и наносятся на одну сводную фильтрационную схему. Обработка сводной фильтрационной схемы заключается в вычислении по интервалам глубин средневзвешенного значения коэффициента фильтрации и построения кривой его распределения в вертикальном разрезе $k_{\Delta z} = f(z)$. По этим данным подсчитывается также накопительная (интегральная) функция водопроводимости с глубиной $T_z = f(z)$. Для построения указанных кривых

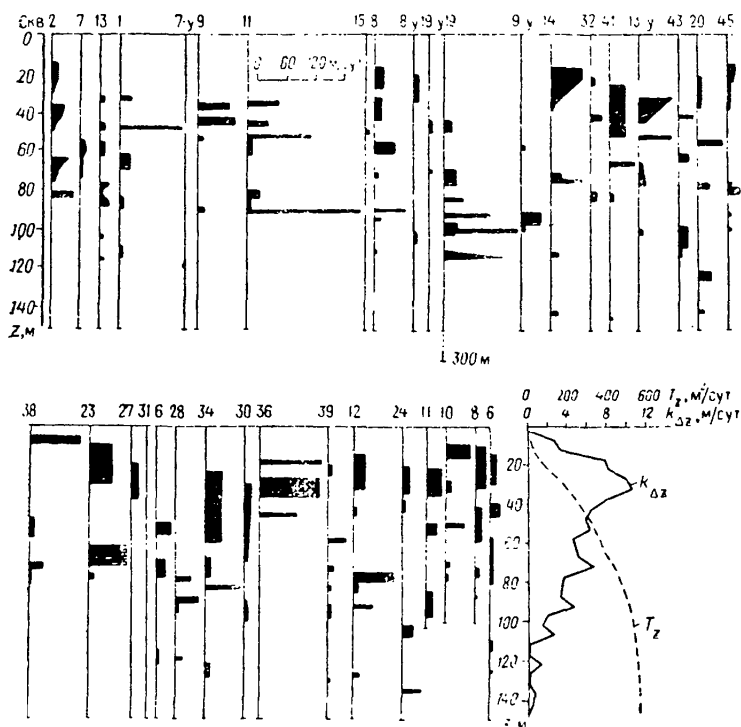


Рис. 29. Определение обобщенных гидрогеологических характеристик Ленинск-Кузнецкого месторождения подземных вод.

темным показана эюра коэффициента фильтрации по каждой скважине.

сводная фильтрационная схема разбивается на равные интервалы осреднения Δz мощностью 5—10 м и более в зависимости от сложности фильтрационного разреза. Подсчет характеристик производится по формулам

$$k_{\Delta z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_{\Delta m} \Delta m}{\Delta z}, \quad (11.37)$$

$$T_z = \sum_{z=0}^{z+\Delta z} k_{\Delta z} \Delta z, \quad (11.38)$$

где $k_{\Delta z}$ — средневзвешенное значение коэффициента фильтрации в интервале осреднения Δz по совокупности скважин; $k_{\Delta m}$ — средний коэффициент фильтрации части водоносного горизонта Δm , попавший в интервал осреднения; n — количество скважин, пересекших данный интервал осреднения; T_z — сред-

невзвешенное значение водопроводимости разреза до глубины z для совокупности скважин.

Рассмотрение кривой $k_{\Delta z} = f(z)$ позволяет выявить общие закономерности изменения фильтрационных свойств в пределах месторождения, например: гидродинамическую зональность или затухание фильтрационных свойств с глубиной и т. п., и на этой основе определить наиболее вероятные глубины встречи максимально водообильных интервалов разреза.

Анализ кривой $T_z = f(z)$ позволяет сделать следующие выводы. Выход этой функции на асимптоту, параллельную оси глубин, соответствует максимальной водопроводимости разреза и указывает на предельную глубину разведки, которая обеспечивает прирост статических запасов. По этой же кривой можно оценить допустимую величину понижения уровня при эксплуатации подземных вод для водоснабжения или необходимую величину водопонижения при осушительных мероприятиях. Данные построения могут быть использованы также для оценки оптимального соотношения между количеством и глубиной заложения эксплуатационных скважин.

На рис. 29 приведен пример построения функций $k_{\Delta z} = f(z)$ и $T_z = f(z)$ по совокупности поисково-разведочных скважин для одного из участков разведки подземных вод в Кузбассе. Скважины были сопоставлены по глубинам.

Указанные построения могут быть выполнены при использовании как абсолютных значений фильтрационных параметров, так и относительных, выраженных в долях единицы.

Изучение условий формирования подземных вод

Обобщение результатов каротажа гидрогеологических скважин на месторождении может дать дополнительный материал для качественного суждения об условиях формирования подземных вод. В силу разнообразия природных условий и недостаточности опыта такого использования данных геофизических исследований трудно предложить какие-то готовые рецепты. Поэтому покажем только на нескольких примерах возможность выяснения некоторых важнейших вопросов, определяющих условия формирования подземных вод.

Изучение условий питания и разгрузки подземных вод

Использование данных каротажа для изучения условий питания подземных вод целесообразно рассмотреть на примере обобщения результатов исследования (главным образом по методу расходомерии) в Кузнецком бассейне¹.

¹ Гидрогеологический анализ данных каротажа проведен Ю. Н. Акуленко по результатам интерпретации автора.

Кузнецкий гидрогеологический бассейн является сложной водонапорной системой. Геологический разрез представлен плотными консолидированными породами от девонского до мелового возраста, перекрытыми сверху четвертичными осадками мощностью 20—70 м. Характерной особенностью геологического строения является литологическая изменчивость пород, отсутствие региональных водоупоров, наличие выветрелой зоны в верхней части разреза. Наиболее обводненными участками являются зоны развития дизъюнктивных нарушений и систем трещин, которые представляют основные пути движения подземных вод. Это установлено по данным расходометрических исследований одиночных и реагирующих скважин в кустах при опытных и опытно-эксплуатационных откачках, которые позволили выявить сложные пути движения подземных вод к скважине. Здесь встречаются трещинно-жильные, трещинные, трещинно-пластовые, трещинно-поровопластовые воды во всевозможных комбинациях и взаимных переходах одних в другие.

Наилучшие условия для аккумуляции основных запасов подземных вод наблюдаются в верхней выветрелой зоне до глубины порядка 100—150 м. По данным расходометрии более 85% водопритока в скважину поступает с глубин, расположенных выше 75 м. Гидрогеологические условия изученного разреза характеризуются наличием нескольких (4—6) водоносных зон, связанных с породами различного литологического состава. Мощности отдельных водоносных зон могут варьировать от 2 до 30 м. Водоносные зоны характеризуются, как правило, различными приведенными напорами, что обуславливает их взаимодействие по стволу скважины. Анализ относительного положения приведенных напоров различных водоносных зон и закономерности его изменения в плане является основным предметом исследования в данном разделе. Положение приведенных напоров и фильтрационные характеристики водоносных зон определены по данным расходометрии.

На рис. 30 приведен схематический гидрогеологический разрез северной части Центрального Кузбасса. По данным расходометрии в вертикальном разрезе выделяется четыре гидродинамических этажа, каждый из которых объединяет от одной до трех водоносных зон. Первый этаж объединяет зоны с удельными дебитами 0,5—1 л/с. Он расположен под долинами рек и под небольшими местными водоразделами второго, третьего и более высокого порядка. Глубина распространения до 40—60 м. В направлении к гипсометрически повышенным участкам рельефа (крупные водоразделы) этот этаж постепенно выклинивается и уступает место третьему этажу, объединяющему зоны с удельным дебитом 0,1—0,5 л/с. На пониженных участках рельефа под первым этажом располагается второй гидродинамический этаж, объединяющий водоносные зоны с удельным дебитом более 1 л/с. Этот этаж характеризуется наибольшей водообильностью.

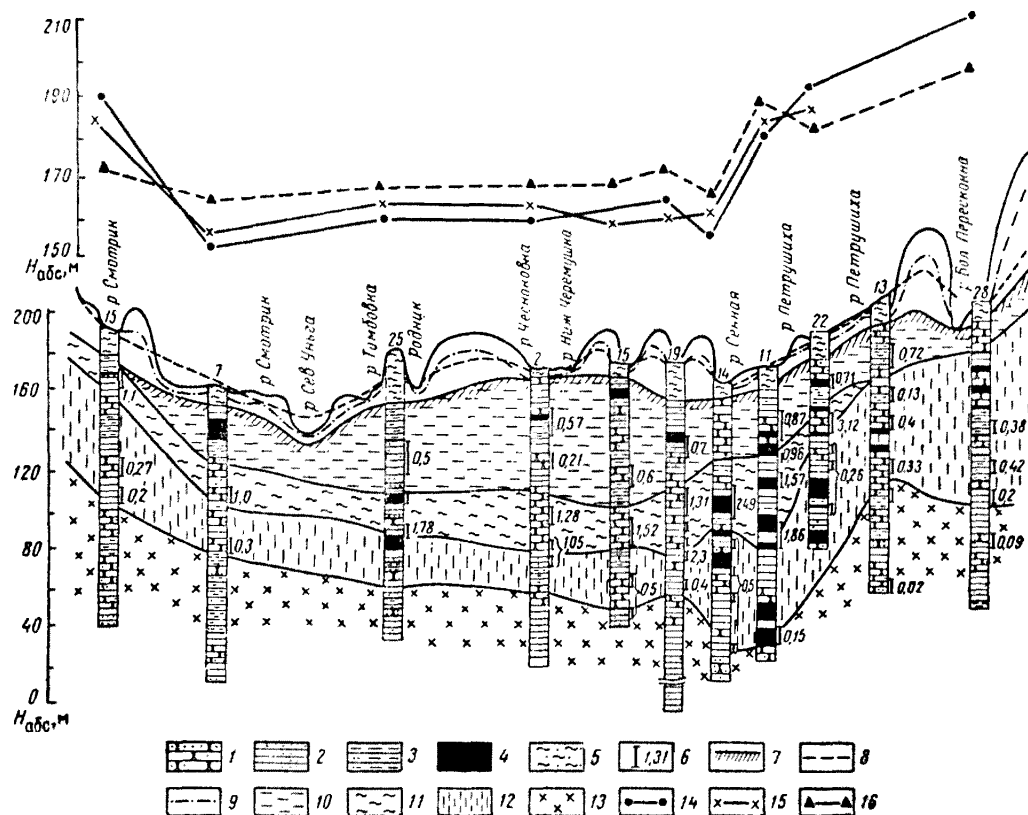


Рис. 30. Схематический гидрогеологический разрез северной части Кузнецкого артезианского бассейна.

1 — песчанники; 2 — алевролиты; 3 — аргиллиты; 4 — угли; 5 — песчано-суглинистые (четвертичные) отложения; 6 — интервал водоносной зоны, ее удельный дебит; 7 — кровля коренных пород; 8 — уровень подземных вод, усредненный по скважинам; 9 — уровень грунтовых вод; 10, 11, 12, 13 — гидродинамические этажи с удельными дебитами соответственно 0,5–1 л/с, более 1 л/с, 0,1–0,5 л/с, менее 0,1 л/с; 14, 15, 16 — пьезометрический уровень соответственно первого, второго и третьего гидродинамических этажей.

Глубина его распространения 50—70 м. В направлении к водоразделам он также выклинивается. На некоторых участках в самой верхней части разреза встречаются зоны с дебитами более 1 л/с, но к водоразделам они выклиниваются. Таким образом, первый и второй этажи могут замещать друг друга в разрезе и характеризуются максимальным развитием под долинами рек и постепенным выклиниванием к водоразделам.

Трестий гидродинамический этаж развит повсеместно. На крупных водоразделах он занимает самое верхнее положение, распространяясь на глубину 60—80 м. На пониженных участках рельефа нижняя граница спускается до глубины 100—120 м. Ниже третьего этажа породы обычно слабо обводнены. Удельные дебиты водоносных зон в этих интервалах менее 0,1 л/с.

В результате определения приведенных напоров (статических уровней) водоносных зон по данным расходомерии установлено, что на водораздельных пространствах статический уровень каждой последующей зоны ниже уровня вышележащей зоны. А статический уровень самой верхней зоны все же остается ниже горизонта грунтовых вод.

В долинах рек статические уровни подземных вод располагаются выше зеркала грунтовых вод, а каждая нижележащая зона обладает более высоким приведенным напором. Здесь же встречаются случаи, когда статический уровень первой зоны может быть ниже зеркала грунтовых вод, но в последующих зонах он выше, и поэтому скважины чаще всего фонтанируют при встрече водоносных зон на более глубоких интервалах бурения. Таким образом, между всеми водоносными зонами имеется разность напоров с различным знаком, зависящим от геоморфологического положения того или иного участка. Это в итоге обуславливает на водоразделах вертикальное нисходящее перетекание подземных вод из одной зоны в другую, а в долинах — восходящее.

Зеркало грунтовых вод четвертичных отложений и пьезометрическая поверхность подземных коренных пород в общих чертах определяется рельефом поверхности. Поток подземных вод направлен от водораздельных областей к местным дренам.

Проведенный анализ результатов расходомерии подтвердил сложившееся представление о картине питания подземных вод, в соответствии с которой Кузнецкий бассейн рассматривается как артезианский бассейн открытого типа, где областями питания являются повышенные участки рельефа, а очагами разгрузки служат долины рек. Наличие местных напоров в депрессиях рельефа обусловлено разницей в абсолютных отметках областей питания и разгрузки и наличием в разрезе локальных водопоров.

Возможность использования результатов геофизических исследований покажем на примере разведки Туймазинского месторождения подземных вод. Разрез месторождения разделяется на четыре водоносных горизонта в соответствии со стратиграфическим строением сверху вниз: водоносный горизонт в аллювиальных гравийно-галечниковых отложениях четвертичной системы, шешминский и соликамский водоносные горизонты в отложениях уфимского яруса пермской системы и кунгурский водоносный горизонт в отложениях кунгурского яруса пермской системы. Гидрогеологические работы в пределах месторождения были ориентированы на оценку возможности организации крупного водоснабжения из соликамского водоносного горизонта при условии его взаимодействия с нижележащим и вышележащим водоносными горизонтами. При эксплуатации соликамского водоносного горизонта основным источником восполнения запасов может служить только сток реки Усени, поэтому объективное решение вопроса о возможности перетекания через шешминский горизонт является принципиальным.

В схематизации гидрогеологических условий месторождения, принятой разведчиками, шешминский горизонт рассматривался как слабопроницаемый, что соответственно ограничивало возможную величину эксплуатационных запасов, тем более что в плане месторождение оконтуривается породами, содержащими воды повышенной минерализации.

Материалы геофизических исследований в скважинах фактически не были использованы для обоснования условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Рассмотрение материалов геофизических исследований и прежде всего данных резистивиметрии и расходометрии позволяет считать, что водоносность надкунгурских отложений представляется в виде локальных зон, связанных с трещиноватостью пород различного литологического состава. Количество этих зон в вертикальном разрезе различных скважин не постоянно. Водоносные зоны не характеризуются также приуроченностью к определенным литологическим разностям. Из общего числа выделенных по каротажу водоносных зон в надкунгурских отложениях перми 28% связано с аргиллитами, 7% с алевролитами, 33% с песчаниками, 17% с мергелями и 15% с известняками. В результате качественного рассмотрения геологических разрезов по скважинам присутствие в разрезе месторождения пластов различного литологического состава кажется равновероятным, за исключением алевролитов, встречающихся существенно реже. Мощности водоносных зон, из которых происходит приток воды в скважину, варьируют в пределах от 1 до 5 м без видимой связи с мощностью пластов. Изучение относительного расположения водонос-

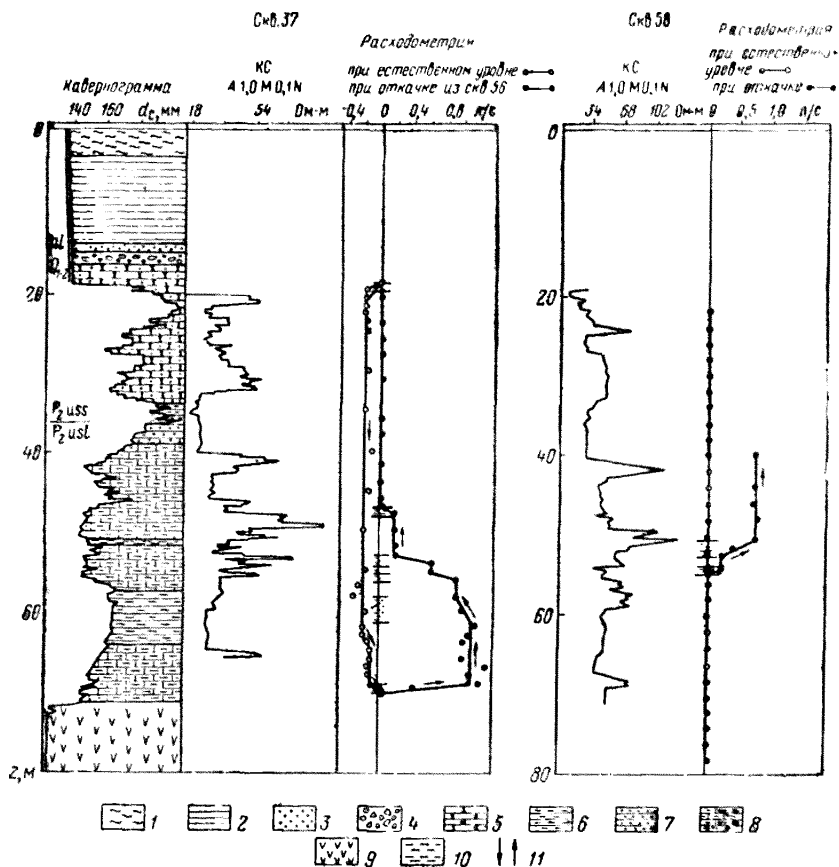


Рис. 31. Исследование гидравлической взаимосвязи шешминского и соликамского горизонтов по данным расходомерического каротажа реагирующей скважины (Туймазинское месторождение подземных вод).

1 — суглинок; 2 — глина; 3 — песок; 4 — галечник; 5 — песчанник; 6 — аргиллит; 7 — алевролит; 8 — мергель; 9 — гипс; 10 — водоносные зоны; 11 — направление перетока воды по стволу скважины

ных интервалов в пределах литологических слоев указывает на отсутствие здесь также какой-либо закономерности. Встречаются случаи, когда верхняя и нижняя границы водоносных зон располагаются в различных по литологии пластах. Водоносные зоны, выделенные в рядом расположенных скважинах, не коррелируются между собой обычными приемами пространственной корреляции. Эти факты свидетельствуют о связи водоносности отложений с тектонической трещиноватостью пород, захватывающей все отложения разведанной толщи, а также о том, что циркуляция подземных вод в пределах надкунгурской толщи в

основном определяется сложноориентированной в пространстве системой локальных зон трещиноватости, не контролируемой литологическими границами. Остается выяснить, захватывают ли эти зоны шешминский и соликамский горизонты или они замкнуты в пределах этих стратиграфических подразделений. Соответствующий ответ содержится в данных расходомерии реагирующей скв. 37, при откачке из скв. 56 (рис. 31). Обе скважины пересекли отложения шешминского и соликамского горизонтов. Сква. 37 встретила водоносные зоны в шешминском и соликамском горизонтах, скв. 56 — только в соликамском. В результате расходомерии в реагирующей скв. 37 во время откачки из скв. 56 установлено, что на возбуждение активно реагирует водоносная зона в шешминском и группа зон в соликамском горизонтах. Самая нижняя водоносная зона в этой же скважине практически не реагирует на заданное возбуждение скв. 56, хотя принадлежит соликамскому горизонту. Эти материалы одновременно подтверждают вывод о локальном в пространстве развитии секущих межпластовых водоносных зон трещиноватости и указывают на существование активной гидравлической связи между ними независимо от стратиграфической принадлежности.

Последний вывод находит подтверждение также при анализе закономерности изменения приведенных давлений (статических уровней) различных водоносных зон, определенных по данным расходомерии одиночных скважин при установившемся режиме. Из этих данных следует, что водоносные зоны, этажно расположенные в разрезе, характеризуются закономерным снижением с глубиной высоты статического уровня. Это вызывает переток воды из вышележащих водоносных зон во всех без исключения скважинах, исследованных методом расходомерии или резистивиметрии. Следует добавить, что такая закономерность характерна для водоносных зон независимо от их стратиграфической принадлежности.

Был проведен анализ частоты встреч водоносных зон на различных глубинах.

Интервал глубин, м	Частота встреч водоносных зон, %	Интервал глубин, м	Частота встреч водоносных зон, %
0—10	—	50—60	18
10—20	14	60—70	12
20—30	16	70—80	10
30—40	14	80—90	—
40—50	16	90—100	—

Из таблицы видно, что до глубины 80 м в пределах пермских отложений в целом на месторождении распределение количества водоносных зон равномерное.

Выяснено количество водоносных зон, встреченных в шеш-

минском и соликамском горизонтах из общего числа, выделенных каротажем в этих отложениях. В процентном отношении они распределены так: шешминский — 77%, соликамский — 23%.

В результате суммирования рассмотренных фактов представляется возможным говорить о существовании здесь единого водоносного комплекса, питаемого за счет вод с поверхности (реки, осадков) транзитом через аллювиальный горизонт по системе сложноориентированных локальных по распространению трещиноватых зон. В связи с различными условиями транзита воды на различных глубинах формируются различные местные напоры, что при пересечении ряда зон скважиной приводит к возникновению различных по интенсивности перетоков, но всегда в одном направлении: сверху вниз. Этот вывод позволяет считать, что существуют достаточно благоприятные условия для восполнения запасов подземных вод соликамского горизонта из вышележащих горизонтов и из реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Б. А., Клушин И. Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л., Гостоптехиздат, 1962. 495 с. с ил.
2. Арцыбашев В. А. Ядерно-геофизическая разведка. М., Атомиздат, 1972. 399 с. с ил.
3. Басин Я. Н., Берман Б. Л., Нейман В. С. О возможности выделения кавернозных и трещиноватых известняков методами промысловой геофизики. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 39. М., «Недра», 1964, с. 153—166 с. ил.
4. Бииндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1970. 214 с. с ил.
5. Блох И. М. Дипольное электропрофилирование. М., Госгеолтехиздат, 1957. 191 с. с ил.
6. Блох И. М. Электропрофилирование методом сопротивлений. М., Госгеолтехиздат, 1962. 240 с. с ил.
7. Бочевеф Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968. 325 с. с ил.
8. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., изд. АН СССР, 1957. 502 с.
9. Булатова Ж. М., Волкова Е. А., Дубров Е. Ф. Акустический каротаж. Л., «Недра», 1970. 264 с. с ил.
10. Вербицкий Т. З., Петкевич Г. И., Шеремета О. В. О методике определения пористости горных пород по данным акустического каротажа. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 39. М., «Недра», 1970, с. 126—132 с. ил.
11. Веселов К. Е., Сагитов М. У. Гравиразведка. М., «Недра», 1968. 512 с. с ил.
12. Воронков О. К., Акатов Ю. Е. Сейсморазведочные исследования на карсте. — «Геология и геофизика». Изд. СО АН СССР. 1967, с. 98—105 с. ил.
13. Гамбурцев Г. А. Корреляционный метод преломленных волн. М., изд. АН СССР, 1952. 215 с. с ил.
14. Гамбурцев Г. А. Основы сейсморазведки. М., Гостоптехиздат, 1959. 378 с. с ил.
15. Гершанович И. М. О количественной интерпретации данных расходомерии гидрогеологических скважин. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 8, с. 47—52 с. ил.
16. Гершанович И. М., Черняк Г. Я. Современные методы каротажа гидрогеологических скважин. ОНТИ Всесоюз. ин-та экономики минерального сырья и геол.-развед. работ, М., 1969. 50 с. с ил.
17. Горелик А. М., Нестеренко И. П. Метод электрического поля фильтрации для определения радиуса депрессионной воронки при откачках из скважин. — «Изв. АН СССР. Сер. геофизич.», 1956, № 11. М., изд. АН СССР, с. 1361—1363 с. ил.
18. Горюнов И. И. Удельное электрическое сопротивление трещиноватой породы. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 38. М., «Недра», 1964, с. 173—179 с. ил.
19. Горюнов И. И. Геофизические исследования трещиноватости горных пород. — В кн.: Проблема трещинных коллекторов нефти и газа и ме-

тоды их изучения. Л., 1968, с. 134—150 с ил. (Всесоюз. науч. исслед. геол.-разв. ин-т. Труды. Вып. 264.)

20. Горяинов Н. Н. Сейсморазведка при инженерно-геологических исследованиях рыхлых пород (Методические рекомендации). М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инж. геологии, 1971. 87 с с ил.

21. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, «Знание», 1969. 245 с с ил.

22. Гринбаум И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., «Недра», 1965. 188 с с ил.

23. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., Гостоптехиздат, 1962. 547 с с ил.

24. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М., «Недра», 1972. 365 с с ил.

25. Дорофеев Б. В., Прейс В. Ф. Электроразведочные работы при региональных гидрогеологических исследованиях (на примере Южного Урала). Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инж. геологии, 1967, с. 56—61 с ил.

26. Елисеева И. С., Степанов П. П. Использование магнитных и гравитационных данных при составлении структурных схем поверхности фундамента. — В кн.: Разведочная и промысловая геофизика, вып. 51. М., «Недра», 1964, с. 49—58 с ил.

27. Заборовский А. И. Электроразведка. М., Гостоптехиздат, 1963. 423 с с ил.

28. Завелов А. И. Некоторые статистические приемы обработки данных электропрофилирования при поисках карстовых полостей в известняках. — «Изв. вузов. Геология и разведка», № 9. М., 1970, с. 148—155 с ил.

29. Игнатович Н. К. Гидрогеологические структуры — основа гидрогеологического районирования территории СССР. — «Советская геология», № 19, 1947, с. 24—33 с ил.

30. Киселев П. Ф. Применение электроразведки при проведении гидрогеологических поисков в пределах Украинского кристаллического щита. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инж. геологии, 1967, с. 71—72 с ил.

31. Клущин И. Г. Комплексное применение геофизических методов для решения геологических задач. Л., «Недра», 1968. 311 с с ил.

32. Кобранова В. Н. Физические свойства горных пород. М., Гостоптехиздат, 1962. 490 с с ил.

33. Комаров В. Л., Лайкам В. М., Голубев Ю. В. Определение пористости карбонатных пород по данным промысловой геофизики. — В кн.: Вопросы геологии и нефтеносности Башкирии. Уфа, 1961, с. 250—271 с ил. (Уфимский нефтяной науч.-исслед. инст. Труды. Вып. VIII.)

34. Комаров С. Г., Щербакова Т. В., Чукин В. Т. Выделение и оценка трещинных коллекторов методами промысловой геофизики. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 36. М., «Недра», 1969, с. 127—134 с ил.

35. Кочетков П. Ф. Применение резистивиметрии при гидрогеологических исследованиях скважин скальных оснований гидротехнических сооружений. — В кн.: Инженерная геофизика. М., 1971, с. 161—179 с ил. (Всесоюз. проектно-изыскат. и науч.-исслед. ин-т Мин. энергетики и электротехники СССР. Труды. Сб. 21.)

36. Ларионов В. В. Определение пористости пород по данным нейтронного гамма-метода. — В кн.: Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых. М., Гостоптехиздат, 1960, с. 105—116 с ил.

37. Левшин А. Л. Определение уровня грунтовых вод сейсмическими методами. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», № 9. М., изд. АН СССР, 1961, с. 1314—1338 с ил.

38. Левшин А. Л., Горяинов Н. Н. Распространение продольных сейсмических волн в песчаных породах. — «Изв. вузов. Геология и разведка», № 4. Изд. Моск. геол.-развед. ин-та, 1962, с. 113—125 с ил.

39. Логачев А. А. Курс магниторазведки. Л., Гостехиздат, 1962. 360 с. с ил.

40. Ляховицкий Ф. М. Методика и интерпретация данных сейсморазведки при инженерно-геологическом картировании. — «Обзор. Сер. Региональная разведочная и промысловая геофизика», М., ОНТИ Всесоюз. ин-та экономики минерального сырья и геол.-разв. работ, 1970. 64 с. с ил.

41. Маннапбеков Т. М. Опыт применения метода ВЭЗ для определения местоположения обводненных тектонических нарушений в Центральном Кызыл-Кумах. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инж. геологии, 1967, с. 66—69 с ил.

42. Матвеев Б. К. Геофизические методы изучения движения подземных вод. М., Гостехиздат, 1963. 133 с. с ил.

43. Методические рекомендации по каротажу гидрогеологических скважин. М., «Недра», 1972. 172 с. с ил. Авт.: И. М. Гершанович, Г. Я. Черняк, И. Т. Гаврилов и др.

44. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. М., «Недра», 1972. 295 с. с ил. Авт.: В. С. Матвеев, Л. С. Язвин, Г. Я. Черняк и др.

45. Неизвестнов Я. В., Позин Э. П. Применение геофизических методов при поисках и разведке подземных источников водоснабжения в пределах Балтийского щита. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и инж. геологии, 1967, с. 33—37 с ил.

46. Нечай А. М. Оценка продуктивности и коллекторских свойств трещиноватых карбонатных пород. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 26. М., Гостехиздат, 1960, с. 149—185 с ил.

47. Нечай А. М. Вопросы количественной оценки вторичной пористости трещиноватых коллекторов нефти и газа. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 38. М., Гостехиздат, 1964, с. 201—212 с ил.

48. Нечай А. М. Изучение трещинных коллекторов методами промысловой геофизики. — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 36. М., «Недра», 1969, с. 111—126 с ил.

49. Никитин В. Н. Определение мощности зон поверхностного разрушения скальных пород с помощью полевой сейсморазведки. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», № 12. М., изд. АН СССР, 1962, с. 1717—1728 с ил.

50. Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста. М., изд. МГУ, 1957. 161 с. с ил.

51. Огильви А. А. Геофизические методы исследований. М., изд. МГУ, 1962. 411 с. с ил.

52. Огильви Н. А. Способ определения простирания доминирующей системы крутопадающих трещин методом электропрофилирования. — «Разведка и охрана недр», 1960, № 12, с. 45—47 с ил.

53. Огильви Н. А., Федорович Д. И. Электrolитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. М., «Недра», 1964. 43 с. с ил.

54. Оценка точности определения водопроницаемости горных пород. М., «Наука», 1971. 150 с. с ил. Авт.: Н. И. Ильин, С. Н. Чернышев, Е. С. Дзекер и др.

55. Пестрыков А. С. О возможности использования промыслово-геофизических данных для определения типа коллекторов. — «Геология нефти и газа», 1964, № 10, с. 46—53 с ил.

56. Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод для целей крупного водоснабжения. Ч. I. М., изд. МГУ, 1965. 243 с. с ил.

57. Поиски и разведка подземных вод для целей крупного водоснабжения. М., «Недра», 1969. 328 с. с ил.

58. Применение методов геофизики при изучении областей формирования стока в карбонатных отложениях артезианских бассейнов. — «Обзор. Сер. Гидрогеология и инженерная геология», № 13. М., ОНТИ Всесоюз. ин-та экономики минерального сырья и геол.-разв. работ, 1969. 35 с. с ил. Авт.: В. А. Богословский, В. Н. Кожевникова, Э. Н. Кузьмина и др.

59. Пылаев А. М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. М., «Недра», 1968. 147 с. с ил.

60. Ризниченко Ю. В. О сейсмической квазинизотропии. — «Изв. АН СССР. Сер. геофиз. и географ.», том XIII, № 6. М., изд. АН СССР, 1949, с. 518—544 с ил.

61. Ручкин А. В. Некоторые приемы выделения трещинных коллекторов методами промысловой геофизики — В кн.: Разведочная геофизика, вып. 34. М., «Недра», 1969, с. 111—116 с ил.

62. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М., «Недра», 1969. 92 с. с ил. Авт.: А. И. Савич, В. И. Коптев, В. Н. Никитин и др.

63. Семенов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. М., «Недра», 1968. 379 с. с ил.

64. Семенов А. С., Поликарпов В. К., Новожилова М. Е. Влияние неоднородности пород при изучении зон трещиноватости и тектонических нарушений методом кругового зондирования. — «Вестник ЛГУ. Сер. геол. и географ.», вып. 24, 1965, с. 78—88 с ил.

65. Соколов В. Н. Применение геофизических методов при поисках воды в Северном Казахстане. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и ниж. геологии, 1967, с. 52—55 с ил.

66. Справочник геофизика, т. II. Геофизические методы исследования скважин. Под редакцией докт. техн. наук С. Г. Комарова. М., Гостехиздат, 1961. 760 с. с ил.

67. Успенский Д. Г. Гравразведка. М., «Недра», 1968. 331 с. с ил.

68. Хаммер З. Современные методы интерпретации материалов гравиметрической и магнитной разведок. IV Международный нефтяной конгресс, том II. М., Гостехиздат, 1956, с. 121—130 с ил.

69. Чевальча Н. А., Дедов В. В., Горловский Б. Л. Применение микросейсморазведки для определения глубины уровня грунтовых вод. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и ниж. геологии, 1967, с. 73—78 с ил.

70. Черняк Г. Я. Электрические и водно-физические свойства рыхлых горных пород. М., изд. Всесоюз. ин-та экономики минерального сырья и геол.-разв. работ, 1969, с. 60 с ил.

71. Чубаров В. Н. Метод оценки питания грунтовых вод путем исследования влагопереноса в зоне аэрации. — «Гидрогеология и инженерная геология», 1968, № 4, с. 8 с ил.

72. Шнурман Г. А. Оценка коллекторских свойств верхнемеловых отложений Восточного Предкавказья по комплексу геофизических исследований. Труды II Всесоюз. совещания по трещинным коллекторам нефти и газа. М., «Недра», 1965, с. 270—277 с ил.

73. Щербакова Т. В. Изучение трещиноватых пород методами каротажа. — «Нефтегазовая геология и геофизика», 1964, № 10, с. 37—42 с ил.

74. Щитов Н. А., Ковалевский В. Т. Применение геофизических методов при гидрогеологических исследованиях восточной части Украины. Материалы семинара по применению геофизических и математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., изд. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та гидрогеологии и ниж. геологии, 1967, с. 48—52 с ил.

75. Эй д м а н И. Е. Удельное электрическое сопротивление. — В кн.: Прикладная геофизика, вып. 15. М., Гостоптехиздат, 1956, с. 140—154 с ил.

76. Э л е к т р о р а з в е д к а источников водоснабжения. М., изд. Всесоюз. науч. исслед. ин-та транспортного строительства, 1956. 232 с. с ил. Авт.: А. М. Горелик. И. П. Нестеренко, А. А. Пустовалов, В. А. Ряполова.

77. Я щ е н к о З. Г., Е с а к о в И. С. К вопросу оценки фильтрационной анизотропии пород при помощи электрического каротажа. — В кн.: Инженерная геофизика. М., 1971, с. 102—108 с ил. (Всесоюз. проектно-испытат. и науч.-исслед. ин-т Мин. энергетики и электроники СССР. Труды. Сб. 21.)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
Предисловие	3
Часть первая	
Геофизические исследования с поверхности	7
Краткая характеристика объектов исследования	7
Общие положения методики и задачи геофизических исследований с поверхности	10
Основные методы исследования	13
Электроразведка	13
Магниторазведка	17
Гравиразведка	17
Сейсморазведка	18
Изучение геометрии водовмещающей среды	18
Картирование водовмещающих пород	20
Картирование зон повышенной водоносности, связанной с трещиноватостью и карстом	31
Изучение структуры и состояния водовмещающей среды	39
Изучение анизотропии	39
Оценка степени трещиноватости пород	42
Определение характера заполнителя трещин и карстовых полостей	45
Изучение условий питания и движения подземных вод	47
Изучение условий взаимосвязи подземных трещинных и трещинно-карстовых вод с водами перекрывающих отложений	48
Изучение условий взаимосвязи подземных трещинных и трещинно-карстовых вод с поверхностными источниками	48
Изучение направления и скорости движения подземных вод	52
Часть вторая	
Геофизические исследования в скважинах	
Общие положения методики и задачи геофизических исследований в скважинах	54
Основные методы исследований	56
Электрокаротаж по методу сопротивлений	56

Метод естественных потенциалов	57
Гамма-каротаж	57
Гамма-гамма-каротаж	58
Нейтронный гамма-каротаж	58
Акустический каротаж	58
Резистивметрический каротаж	59
Расходометрический каротаж	59
Другие методы каротажа	60
Выделение трещиноватых (обводненных) зон в разрезе скважин .	61
Изучение емкостных свойств трещиноватых горных пород . . .	78
Оценка общей пустотности трещиноватых пород	80
Оценка трещинной (активной) пористости пород	86
Оценка водопроницаемости пород	89
Изучение гидравлической взаимосвязи различных горизонтов . .	97
Использование данных каротажа для анализа гидрогеологических условий месторождений	105
Характеристика типа коллектора	105
Изучение структуры коллекторов	107
Изучение изменчивости фильтрационных свойств горных пород . .	110
Изучение условий формирования подземных вод	113
Список литературы	121

ИССАК МАРКОВИЧ ГЕРШАНОВИЧ

**Разведка месторождений подземных
вод в трещиноватых породах
геофизическими методами**

Редактор издательства *И. П. Иночкина*
Обложка художника *С. А. Смирновой*
Технический редактор *А. Е. Матвеева*
Корректор *Т. Ю. Шульц*

Сдано в набор 4/XII 1974 г. Подписано в печать 23/I 1975 г. Т-01436 Формат 60×90^{1/16}.
Бумага № 2. Печ. л. 8,0 Уч.-изд. л. 8,31
Тираж 3300 экз. Заказ № 1886/5183—3
Цена 42 коп.

Издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд 1/19

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