Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!
Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Н.И.ПЛОТНИКОВ

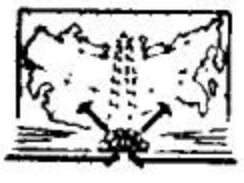
ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Н.И.ПЛОТНИКОВ

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Допущено Министерством
высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов
высших учебных заведений, обучающихся
по специальности «Гидрогеология и инженерная геология»



МОСКВА „НЕДРА" 1985

УДК 550.812.1:556.3(075.8)

Плотников Н. И. Поиски и разведка пресных подземных вод: Учеб. пособие для вузов.— М.: Недра, 1985.— 370 с., ил.

Даны сведения о развитии разведочной гидрогеологии, ролн и значении подземных вод в народном хозяйстве, об основах поисков и разведки месторождений пресных подземных вод, о закономерностях распространения промышленных типов месторождений этих вод и прогнозные ресурсы. Приведены основные типы водозаборных сооружений. Изложены требования к изучению и использованию пресных подземных вод, методика их поисков и разведки. Уделено внимание обоснованию искусственного восполнения запасов подземных вод, методике оценки естественных и эксплуатационных запасов, а также влиянию техногенных процессов на изменение геологической среды при эксплуатации подземных вод.

Для студентов геологических вузов по специальности «Гидрогеология и инженерная геология».

Табл. 32, ил. 74, список лит.— 34 назв.

Рецензенты: *кафедра гидрогеологии* (Московский геолого-разведочный институт им. С. Орджоникидзе); *Л. С. Язвин*, д-р геол.-минер. наук (Всесоюзный институт гидрогеологии и инженерной геологии)

Николай Иванович Плотников

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Редакторы издательства О. Л. Виноградова, Л. А. Дубкова
Переплет художника Г. Н. Погореловой
Художественный редактор В. В. Шутько
Технический редактор Л. Г. Лаврентьева
Корректор И. Ю. Каменская

ИБ № 5398

Сдано в набор 30.10.84. Подписано в печать 11.05.85. Т-10928. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 23,00. Усл. кр.-отт. 23,00. Уч.-изд. л. 25,00. Тираж 4000 экз. Заказ № 2170/9410—2. Цена 1 р. 20 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.

П $\frac{1904060000—206}{043(01)—85}$ 123—85

© Издательство «Недра», 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года», принятых XXVI съездом КПСС, четко определены задачи в области дальнейшего расширения в стране минерально-сырьевой базы, в том числе отмечена необходимость усиления поисков и разведки пресных подземных вод.

Пресные подземные воды играют существенную роль в развитии производительных сил. Достаточно отметить, что хозяйственно-питьевое водоснабжение более чем в 62 % всех городов СССР основано на использовании подземных вод. В некоторых районах СССР (Белоруссия, Литва и Армения) водоснабжение городов и промышленных предприятий целиком базируется на подземных водах. В Узбекистане, Киргизии, Таджикистане, южных областях Казахстана, на юге Украины и на Северном Кавказе пресные подземные воды, помимо водоснабжения, широко используются для орошения крупных земельных массивов.

Советское правительство постоянно проявляло большое внимание к изучению, учету и рациональному использованию водных ресурсов, в том числе ресурсов пресных подземных вод — высококачественного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Одним из важнейших декретов, принятых после Великой Октябрьской социалистической революции и подписанных В. И. Лениным, был декрет «О земле» (1917 г.). Земля, воды и недра страны, согласно этому декрету, были полностью национализированы и стали общенародным достоянием, составляющим общегосударственную собственность.

Не меньшее значение для народного хозяйства имел подписанный В. И. Лениным (1919 г.) декрет «Об учете буровых на воду скважин», в котором указывалось, что артезианские воды являются одним из главнейших источников снабжения населения доброкачественной водой. В связи с этим научно-техническому отделу Высшего Совета Народного Хозяйства предписывалось в срочном порядке произвести учет всех имеющихся в пределах республики гидрогеологических скважин с целью разработки мероприятий по их рациональному использованию и охране артезианских вод от истощения и загрязнения.

В последующие годы в нашей стране систематически проводилась работа по дальнейшему развитию и воплощению в жизнь ленинских идей в области охраны, защиты и рационального использования ресурсов подземных вод. Так, были приняты постановления «О санитарной охране водопроводов и источников водоснабжения» (1937 г.), «О мерах по упорядочению использования и усилению охраны водных ресурсов СССР» (1960 г.).

Очень важным является принятый Верховным Советом СССР в 1970 г. закон «Основы водного законодательства Союза ССР и Союзных республик». В нем строго регламентируются основные принципы использования и охраны подземных и поверхностных вод, определены права и обязанности всех водопотребителей. Этим законом предписывается использование пресных подземных вод * в первую очередь для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения городов, населенных пунктов, совхозов и колхозов.

В целях упорядочения общего водохозяйственного баланса, в том числе баланса подземных вод, в нашей стране проводится большая работа по ведению государственного учета вод и государственного водного кадастра.

В 1965 г. и в 1968 г. вышли в свет две монографии автора, которые использовались как учебные пособия по курсу «Поиски и разведка пресных подземных вод». За последнее время в области поисков и разведки подземных вод накоплен большой опыт эксплуатации подземных вод и разработаны некоторые новые методические приемы проведения основных видов гидрогеологических исследований, оценки разведанных запасов. Кроме того, были внедрены в практику работ новые требования государственных контрольных органов и, в первую очередь, Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР (ГКЗ СССР) по разведке и оценке запасов подземных вод, изложенные в новых классификациях эксплуатационных запасов и в инструкции по применению этой классификации, а также требования по охране и защите окружающей среды в районах интенсивной эксплуатации подземных вод. Внедрено новое положение о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения.

Таким образом, возникла необходимость составить новое учебное пособие, содержание которого полностью отвечало бы современным требованиям науки и практики.

Настоящее учебное пособие составлено в соответствии с утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования СССР программой курса, который входит в индивидуальный учебный план МГУ им. М. В. Ломоносова. В других учебных заведениях этот курс читается под другим названием: «Оценка эксплуатационных запасов подземных вод».

При составлении учебного пособия учтен основной принцип построения прикладных разделов фундаментального курса общей гидрогеологии — сохранение прямых связей между отдельными последовательно связанными разделами курса. Вместе с тем в этой схеме учитываются и обратные связи между основными разделами курса.

---

* Здесь и далее под пресными водами подразумеваются питьевые воды, как это принято в Инструкции ГКЗ СССР [15] и ГОСТах.

Главы 1—11, а также 13, 14, 15 и 18 написаны Н. И. Плотниковым, глава 16 составлена Н. И. Плотниковым по материалам книги «Оценка эксплуатационных запасов подземных вод» (1983 г.), а также своих работ и работ Ф. М. Бочевера. Глава 17 написана Н. И. Плотниковым и И. К. Сычевым, глава 12 — М. П. Полкановым при участии Н. И. Плотникова, глава 10— Н. Н. Шарапановым и И. М. Гершановичем, глава 19 — Б. В. Боревским, М. В. Кочетковым и Т. Л. Плугиной глава 20 — М. П. Полкановым и Н. И. Плотниковым при участии В. С. Плотникова, глава 21 — Д. И. Пересунько и И. И. Крашиным, глава 22 — Б. В. Боревским и Н. Б. Бондаренко; глава 23 — И. И. Рогинец.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры гидрогеологии МГУ, профессорам В. М. Шестакову и В. А. Всеволожскому, д-ру геол.-минер. наук И. С. Зекцеру за ценные советы и замечания, высказанные ими при подготовке рукописи к опубликованию.

Раздел I.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕДМЕТЕ

Глава 1

ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОИСКАХ И РАЗВЕДКЕ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РОССИИ

Работы по использованию пресных подземных вод для целей водоснабжения городов и отдельных населенных пунктов проводились в России еще в XV в. К этому времени относятся первые попытки использовать подземную воду, выходящую на поверхность в виде родников, т.е. естественную разгрузку подземных вод. Примитивный каптаж родников, расположенных вблизи населенных пунктов, позволял без глубоких геологических знаний и инженерных решений осуществлять их хозяйственно-питьевое водоснабжение. Этот период можно назвать этапом примитивного использования родникового стока.

В 1492 г. в Москве был построен первый водопровод для организации водоснабжения Кремлевских дворцов. Для этой цели был оборудован довольно примитивный каптаж родников, выходящих под угловой Арсенальной башней, вода подавалась по деревянным желобам. Однако этой воды оказалось мало, поэтому в 1631—1633 гг. был устроен первый каптаж поверхностных вод в долине р. Москвы. В связи с этим был создан первый в России напорный водовод из свинцовых труб.

В конце XVII в. и в первой половине XVIII в. возникла необходимость расширить использование подземных вод для водоснабжения городов и отдельных предприятий. Этот период развития работ по использованию пресных вод родников характеризуется инженерным подходом к строительству каптажных сооружений и первыми попытками геологического изучения условий выхода подземных вод на поверхность. В связи с этим были выполнены первые инженерные разработки схем каптажных сооружений. Продолжались работы по каптажу группы родников, выходящих по побережью Финского залива для водоснабжения Царского Села (ныне г. Пушкин), Павловска, С этой целью был построен Таицкий водопровод.

Для расширения водоснабжения г. Москвы было проведено изучение группы родников, выходящих в долине р. Яузы в селении Большие Мытищи. Родники были каптированы, и вода по водопроводу подавалась в город. Выполнялись также каптажные работы по захвату родников с целью решения проблем водоснабжения городов Оренбурга, Дербента, Тулы, Калуги и др.

К этому периоду можно отнести и первые в России работы по бурению гидрогеологических разведочных и эксплуатационных скважин с целью применения подземных вод для децентрализованного водоснабжения отдельных объектов. При этом вначале использовались артезианские воды из фонтанирующих скважин, эксплуатация которых осуществлялась без насосного оборудования. Появились первые в России теоретические разработки в области гидродинамики, авторами которых были И. Бернулли и Л. Эйлер.

В конце XVIII в. и в XIX в. возникла необходимость организации по всей стране поисково-разведочных работ с целью разрешения проблем водоснабжения городов, фабрик, заводов и т. д. Бурение разведочных скважин производилось частными фирмами, глубина скважин в этот период достигала 200 м.

Первые попытки геологического осмысления поисков и разведки подземных вод относятся к 1840—1860 гг., когда под руководством академика Г. П. Гельмерсена были составлены первые так называемые геогностические карты России. В 1863 г. была опубликована его работа «Об артезианских колодцах», где он изложил теоретические предпосылки добычи подземной воды посредством артезианских колодцев. В дальнейшем бурение скважин производилось на геологической основе.

Важное значение для научного обоснования поисков и разведки пресных подземных вод имели гидрогеологические исследования регионального характера, выполненные под руководством С. Н. Никитина (по Московскому артезианскому бассейну), Г. Д. Романовского (по району Крыма), Н. А. Соколова (по артезианским бассейнам южной России), А. А. Иностранцева (по Северо-Западному артезианскому бассейну) и др. На основании результатов, полученных при региональных гидрогеологических исследованиях, формировалось учение об артезианских бассейнах. К этому времени сложились первые представления о геологическом строении и гидрогеологических условиях Московского, Северо-Западного (Ленинградского), Днепровско-Донецкого, Крымского и других артезианских бассейнов.

Продолжались работы по совершенствованию теоретических основ гидродинамики. Была опубликована работа К. Э. Лембке «Движение грунтовых вод и теория водосборных сооружений».

Большое значение для развития работ в области поисков и разведки пресных подземных вод имела деятельность Геологического Комитета, организованного в 1882 г. при Горном департаменте Министерства государственных имуществ. В это время в русской геологической литературе становится общепризнанным понятие о гидрогеологии как о самостоятельной науке. Геологический комитет уделял большое внимание изучению пресных подземных вод России, например, были проведены региональные геологические и гидрогеологические съемки отдельных районов России. Крупные гидрогеологические работы

для целей водоснабжения проводились в Средней Азии, Казахстане и Сибири, в связи со строительством транссибирской железной дороги.

В начале XX в. в высших учебных заведениях России началось чтение лекций по гидрогеологии, в том числе по разведке пресных подземных вод, что позволило начать подготовку кадров в области проведения гидрогеологических исследований.

В этот период, благодаря исследованиям Н. Е. Жуковского, Н. Н. Павловского и А. А. Краснопольского, дальнейшее развитие получила разработка теоретических основ гидродинамики, в том числе теории притока воды к скважинам.

Принципиально новый этап в развитии гидрогеологических работ по разведке пресных подземных вод начался после Октябрьской социалистической революции, когда все геологические работы в нашей стране стали проводиться планомерно в соответствии с требованиями развития народного хозяйства. Большое внимание уделялось гидрогеологическим работам в области разведки пресных подземных вод для целей водоснабжения ряда городов и промышленных предприятий. Проводились региональные геологические и гидрогеологические исследования территории страны с целью создания научных основ поисков и разведки пресных подземных вод. Под руководством А. Н. Мазаровича была подготовлена работа «Методика гидрогеологических исследований» (1926 г.); П. Н. Чирвинским был составлен первый учебник по гидрогеологии (1922 г.).

В 40-х годах вышли в свет две крупные работы М. Е. Альтовского в области разведочной гидрогеологии — «Методика гидрогеологических исследований в целях водоснабжения» и «Временная инструкция по расчету взаимодействующих артезианских скважин», а также работы Н. А. Плотникова в области оценки и классификации ресурсов пресных подземных вод.

Значительным событием в развитии отечественной гидрогеологии, в том числе работ по поискам и разведке подземных вод, явился Первый Всесоюзный гидрогеологический съезд (1931 г.). На съезде были заслушаны доклады Н. Ф. Погребова «Артезианские воды нижнекембрийских отложений Ленинградской области», А. Н. Семихатова «Задачи исследования Московского каменноугольного бассейна, в связи с водоснабжением Москвы» и «Южнорусская артезианская мульда» (Днепровско-Донецкий артезианский бассейн), Д. И. Щеголева «Водная проблема Донбасса» и др. Были намечены пути дальнейшего развития гидрогеологических работ и в первую очередь в области регионального изучения территории СССР и выявления ресурсов пресных подземных вод.

Проводились крупные поисково-разведочные гидрогеологические работы с целью изыскания источников водоснабжения в таких крупных промышленных районах, как Донбасс, Урал, Сибирь, Средняя Азия, для выбора дополнительных источников водоснабжения городов Баку, Тбилиси, Самарканд, Ташкент,

Москва, Тула, Ашхабад, Минск и др., а также объектов сельского хозяйства.

Из монографий того времени наибольший интерес представляет работа «Материалы для характеристики ресурсов подземных вод по районам СССР», выпущенная под редакцией Ф. П. Саваренского, М. М. Васильевского и Д. И. Щеголева. Были опубликованы первые предложения по классификации ресурсов и запасов пресных подземных вод (Ф. П. Саваренский, П. И. Бутов и др.).

Таким образом, этот этап развития отечественной гидрогеологии ознаменовался укреплением научно-методических и гидрогеологических основ поисково-разведочных работ, их планомерным проведением в общегосударственном масштабе и созданием первых инструкций.

Разработка методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод при этом базировалась на фундаментальных положениях теории фильтрации, изложенных в трудах Л. С. Лейбензона, Н. Н. Павловского, П. Я. Полубариновой-Кочиной и др.

В период Великой Отечественной войны работы по поискам и разведке пресных подземных вод продолжались в двух направлениях — для нужд фронта и для обеспечения потребностей народного хозяйства.

В послевоенное время выделяется несколько очень важных этапов в развитии поисково-разведочных гидрогеологических работ в нашей стране. Первым из них стал выход из печати монографий Г. Н. Каменского «Поиски и разведка подземных вод» (1947 г.) и «Основы динамики подземных вод» (1943 г.). В первой работе излагались научные основы поисков и разведки пресных подземных вод как самостоятельного прикладного раздела гидрогеологии. Г. Н. Каменский высказал идею о формировании в верхней части земной коры месторождений пресных подземных вод, рассмотрел гидрогеологическую съемку как метод первоначальных поисков подземных вод, обосновал необходимость применения геофизических методов исследования при поисково-разведочных работах и систематизировал общие принципы разведки и методики гидрогеологических исследований. Во второй монографии были заложены основы гидродинамического метода оценки естественных ресурсов и эксплутационных запасов.

Большое значение для развития поисков и разведки подземных вод имели введение нового научного понятия эксплуатационные запасы подземных вод, создание их классификации по степени изученности и разведанности, разработка официальных требований к методике поисков, разведки и оценки запасов, а также утверждение разведанных запасов подземных вод в Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых при Совете Министров СССР (ГКЗ СССР).

Была утверждена инструкция по применению классификационных запасов подземных вод, в которой строго регламентиро-

ваны требования ГКЗ СССР к проведению поисково-разведочных работ, методике поисков, разведки и оценки запасов подземных вод, а также изложены условия отнесения разведанных запасов к той или иной категории достоверности.

В период с 1951 по 1963 гг. были разработаны новые научно-методические руководства по проведению поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод применительно к новым требованиям инструкции ГКЗ СССР. Большую роль в оказании методической помощи производственным организациям в проведении поисково-разведочных гидрогеологических работ сыграли научные труды Н. А. Плотникова, С. К. Абрамова, Н. И. Плотникова, Ф. М. Бочевера, Н. Н. Веригина, Н. Н. Биндемана и др.

К этому времени относится разработка теоретических основ учения о формировании в земной коре месторождений пресных подземных вод. Одновременно с этим развивались исследования по оценке подземного стока СССР, что позволило установить общие закономерности формирования естественных ресурсов на территории нашей страны.

На этом этапе были разработаны принципиально новые методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод, базирующиеся на теории упругого режима и неустановившейся фильтрации (Ф. М. Бочевер, В. Н. Щелкачев, Н. Н. Веригин, В. М. Шестаков и др.). В разработке методов расчета водозаборных скважин большую роль сыграли работы зарубежных ученых — Ч. Тейса, М. Хантуша, Ч. Джекоба, Н. Болтона и др.

В указанный период проводились планомерные разведочные работы в различных районах СССР по изысканию подземных вод. В результате этих работ были решены проблемы водоснабжения ряда промышленных центров на Урале, городов центральных районов РСФСР, городов-спутников Москвы, крупных городов на Украине, в Казахстане, в республиках Средней Азии и Прибалтики.

Была разработана новая методика прогнозной оценки эксплуатационных запасов подземных вод в региональном плане. Внедрение ее в практику позволило гидрогеологической службе СССР в 1963 г. выполнить региональную оценку общих прогнозных эксплуатационных ресурсов в целом по стране и составить ряд специализированных гидрогеологических карт, отражающих условия их формирования, а также выявить регионы, перспективные для проведения поисково-разведочных работ — все это сыграло большую роль в размещении производительных сил.

В гидрогеологическую науку и практику было введено понятие о граничных условиях водоносных горизонтов как об основных факторах, определяющих формирование эксплуатационных запасов подземных вод (работы Ф. М. Бочевера, Н. Н. Биндемана и др.). Еще одной особенностью современного этапа развития разведочной гидрогеологии является широкое внедре-

ние в теорию и практику методов математического моделирования гидрогеологических процессов на АВМ и ЭЦВМ. С их помощью успешно решаются задачи не только непосредственной оценки эксплуатационных запасов, но и определения основных направлений поисково-разведочных работ на месторождениях подземных вод. Значительную роль в разработке научно-методических основ математического моделирования сыграли исследования В. М. Шестакова, И. К. Гавич, И. Е. Жернова, И. И. Крашина, Д. И. Пересунько, В. С. Плотникова и др.

В 1983 г. была разработана новая классификация эксплуатационных запасов подземных вод и инструкция ГКЗ СССР по применению этой классификации, а также опубликован ряд новых методических пособий по поиску, разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод.

К современному этапу развития поисково-разведочных гидрогеологических работ относится начало проведения исследований по искусственному восполнению эксплуатационных запасов подземных вод, по защите подземных вод от загрязнения и истощения, по составлению прогнозов изменения их качества, а также по охране окружающей среды, в связи с интенсивным отбором подземных вод из недр Земли системой групповых водозаборов.

Большую роль в развитии теории, методов и практики разведочных гидрогеологических работ в нашей стране сыграли решения XXIV, XXV и XXVI съездов КПСС, которые поставили очень важные задачи по усилению поисков и разведки подземных вод, рациональному их использованию в народном хозяйстве.

Глава 2
РОЛЬ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

Подземные воды играют существенную роль в развитии различных отраслей народного хозяйства нашей страны. В зависимости от нужд народного хозяйства все типы подземных вод, распространенных в гидрогеосфере, можно разделить на четыре группы: пресные, термальные, минеральные и промышленные (табл. 1).

Для этих типов подземных вод в настоящее время разработаны общие принципы и методы их разведки. Например, общим научно-методическим приемом является стадийность разведки месторождений подземных вод, что позволяет с помощью последовательных приближений выявить месторождения по результатам детальных поисков, изучить условия формирования эксплуатационных ресурсов по данным предварительной разведки и подготовить его к промышленному освоению по резуль-

Таблица 1. Типы подземных вод (по их значению в народном хозяйстве)

Типы подземных вод	Условия отнесения подземных вод к данному типу	Использование в народном хозяйстве	Основные показатели для использования
I. Пресные подземные воды	ГОСТ 2874—82	Преимущественно для целей хозяйственно-питьевого назначения	Дебит водозабора на расчетный срок отбора
II. Термальные подземные воды:			
низкотемпературные	Температура до 80 °С	Для бальнеологнческих целей, а также теплофикации зданий и теплоснабжения теплиц	Дебит водозабора, температура и теплоемкость подземных вод
высокотемпературные	Температура более 100 °С	Для получения электроэнергии и бальнеологических целей	То же
III. Минеральные подземные воды	Воды питьевые лечебные (ГОСТ 2874—82). Для бальнеологических минеральных вод: повышенная минерализация, повышенное содержание углекислого, сероводородного газа или специфических микроэлементов (иода, брома, мышьяка и др.)	Для питьевых нужд (так называемые столовые воды) и бальнеологических целей	Дебит водозабора, а также содержание в подземных водах газов и других специфических компонентов
IV. Промышленные подземные воды	Повышенное содержание полезных компонентов (иода, брома, стронция и др.), извлечение которых из подземных вод экономически целесообразно	В химической промышленности	Дебит водозабора, а также запасы содержащихся в подземных водах полезных компонентов

татам детальной разведки объекта. К общим принципам следует также отнести принцип экономической целесообразности разведки месторождений и др.

Вместе с тем изучение каждого выделенного типа подземных вод имеет специфические особенности, главной из которых является определение основных параметров, необходимых для оценки эксплуатационных запасов. Так, для минеральных подземных вод, помимо выявления их количества на месторождении (эксплуатационные запасы), необходимо по результатам разведки качественно и количественно оценить газовый состав, а также устойчивость в процессе эксплуатации определенных полезных для бальнеологии химических компонентов.

При разведке месторождений термальных подземных вод необходимо оценить такой параметр, как теплоемкость подземных вод, а при разведке промышленных подземных вод — содержание в них (запасы) того или иного полезного компонента, извлечение которого намечается при эксплуатации. Имеется определенная специфика и в методике разведки пресных, термальных, минеральных и промышленных подземных вод, которая заключается в принципах размещения разведочных скважин, проведении опытно-фильтрационных работ, а также в применении средств разведки. Учитывая эти обстоятельства, вполне правомерно самостоятельное рассмотрение методики поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов различных типов подземных вод.

Поскольку пресные подземные воды используются в нашей стране преимущественно для хозяйственно-питьевого водоснабжения городов, поселков и сельскохозяйственных объектов, планомерное обеспечение этими водами народного хозяйства с учетом растущего водопотребления следует рассматривать как важнейшую социальную проблему нашего общества. Структура источников водоснабжения городов СССР следующая: водоснабжение 62 % городов базируется целиком на использовании подземных вод, 21 % городов — построено на использовании подземных и поверхностных вод, в остальных городах водоснабжение базируется на поверхностных водах (данные института ВСЕГИНГЕО).

Учитывая это обстоятельство, важно определить, какими общими ресурсами пресных подземных вод обладает наша страна? Региональными исследованиями было установлено, что из общих прогнозных эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод в целом по СССР более 60 % составляют ежегодно возобновляемые, т. е. неистощимые ресурсы, использование которых может осуществляться неограниченно долгое время.

Вместе с тем следует отметить, что прогнозные эксплуатационные ресурсы пресных подземных вод на территории нашей страны распространены чрезвычайно неравномерно. Например, на территории Казахской ССР более 50 % общих прогнозных

эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод формируется в южных районах республики (Алма-атинская, Чимкентская, Джамбулская области). Огромная территория Центрального Казахстана, где расположен крупный горнодобывающий регион (районы эксплуатации рудных и угольных месторождений), имеет весьма ограниченные ресурсы пресных подземных вод. Именно поэтому и возникла необходимость строительства в этом регионе Иртышского обводнительного канала для подачи воды из р. Иртыша для водоснабжения городов и промышленных центров, а также для искусственного орошения земель.

Аналогичные условия формирования эксплуатационных запасов пресных подземных вод отмечаются на территории Украины, где 45 % общих ресурсов формируется в пределах Днепровского-Донецкого артезианского бассейна, а южные районы имеют весьма ограниченные ресурсы пресных подземных вод. На территории Армении 65 % всех прогнозных ресурсов подземных вод формируется в пределах Араратского артезианского бассейна. Ограниченными ресурсами пресных подземных вод отличается территория Молдавии.

Именно поэтому перед некоторыми областями и республиками нашей страны стоит проблема обеспечения пресными водами. Для решения этой проблемы требуется осуществить ряд водохозяйственных мероприятий с целью комплексного использования подземных и поверхностных вод. Учитывая большое значение пресных подземных вод для народного хозяйства, в нашей стране введена система кадастрового учета использования подземных вод, а также организована система государственной и межведомственной наблюдательной сети для изучения режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях.

Результаты выполняемых в настоящее время исследований по прогнозной оценке региональных эксплуатационных запасов в целом по стране могут служить надежной научной основой для планирования поисково-разведочных гидрогеологических работ.

Большое внимание в нашей стране уделяется формированию общегосударственных требований к использованию пресных подземных вод в народном хозяйстве. Например, в «Основах водного законодательства Союза ССР и союзных республик» строго регламентируются условия использования водных ресурсов. В статье 21 этого документа указывается, что использование пресных подземных вод питьевого качества должно осуществляться преимущественно для организации централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и сельскохозяйственных объектов.

В тех областях страны, где отсутствуют поверхностные водные источники (например, некоторые районы аридной зоны СССР) и имеются достаточные запасы пресных подземных вод

питьевого качества, их использование, не связанное с хозяйственно-питьевым водоснабжением, допускается только с разрешения местных органов (так называемых бассейновых инспекций) Министерства мелиорации и водного хозяйства СССР, которые регулируют использование и охрану водных ресурсов.

Что касается других типов подземных вод, не отнесенных по своему качеству к категории «питьевых», то они могут быть использованы для технического водоснабжения, орошения земель или других производственных нужд в установленном порядке с соблюдением всех правил, предусмотренных «Водным законодательством СССР» (рациональное использование, охрана и т. д.).

Важным документом, излагающим общие требования к использованию пресных подземных вод, являются «Основы законодательства Союза ССР и союзных республик о недрах», строго регламентирующие рациональное использование природных ресурсов, предусматривающие комплексное освоение месторождений всех видов полезных ископаемых, а также охрану окружающей среды, в частности подземных вод от истощения и загрязнения.

Очень важные положения о проведении разведки месторождений пресных подземных вод и оценки их эксплуатационных запасов изложены в инструкции ГКЗ СССР по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод.

Глава 3
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВЫБОРА ТИПА ВОДОЗАБОРНОГО СООРУЖЕНИЯ

Конечной целью разведки месторождений подземных вод являются оценка их эксплуатационных запасов и подготовка объекта к промышленному освоению. При этом, как следует из требований инструкций ГКЗ СССР, оценка эксплуатационных запасов подземных вод по конкретному разведочному участку должна производиться применительно к той или иной рациональной схеме водозаборного сооружения. Поэтому целесообразно кратко рассмотреть основные типы водозаборных сооружений и гидрогеологические условия их применения (табл. 2).

Горизонтальные водозаборы в виде галерей обычно проектируются на месторождениях с близким залеганием уровня подземных вод и небольшой мощностью водоносного горизонта (до 10 м), т. е. в условиях, когда не представляется возможным создать на каптаже большие понижения уровня подземных вод. Для повышения общей производительности горизонтального водозабора устраиваются галереи большой протяженности (рис. 1).

При определенных гидрогеологических условиях (см. табл. 2) лучевые водозаборы являются наиболее производительными.

Таблица 2. Характеристика основных типов водозаборов по захвату подземных вод

Типы водозаборов	Подтипы водозаборов	Гидрогеологическне условия применения	Примерная конструкция
Горизонтальные	Водозаборная галерея (одностороннего или двухстороннего питания)	На месторождениях при неглубоком залегании уровня подземных вод и незначительной мощности водоносного горизонта (до 10 м). Устраиваются вдоль современных русел рек с постоянными водотоками или в береговой части искусственных водоемов	Галерея с бетонными перфорированными стенками, фильтрами и приемным колодцем
	Лучевые водозаборы (одноярусные и двухъярусные)	На месторождениях при неглубоком залегании уровня подземных вод и средней мощности водоносного горизонта (до 30 м). Лучевые фильтры-скважнны устраиваются вдоль береговой зоны или непосредственно под руслом реки с постоянным водотоком	Водоприемная шахта и горизонтальные дренажные (в виде лучей) скважины, пройденные со ствола шахты в водоносном горизонте в радиальном направлении
Вертикальные (буровые скважины)	Одноярусные	На месторождениях подземных вод речных долин с мощностью продуктивного горизонта более 20 м; линейный ряд взаимодействующих скважин, расположенных вдоль современного русла реки, имеющей постоянно действующие водотоки, — наиболее производительные водозаборы инфильтрационного типа. На площади других месторождений подземных вод — в внде линейного ряда взаимодействующих скважин	Буровые скважнны в виде линейного ряда, оборудованные в продуктивном горизонте фильтрами

Многоярусные	На площади месторождений подземных вод с мощной толщей водоносного горизонта (более 100 м) целесообразно задавать многоярусные взаимодействующие группы скважин, обеспечивающие наиболее компактный интенсивный отбор подземных вод	Две-три близко расположенные на различной глубине скважины (в 4—5 м друг от друга) с ярусным расположением фильтров
Многозабойный — линейный ряд взаимодействующих скважин	Целесообразно задавать на площади месторождений трещинно-карстовых вод, где карбонатные водоносные породы обладают высокой степени фнльтрационной неоднородностью	Из основного ствола разведочно-эксплуатационной скважины бурят несколько боковых ответвлений (с помощью направляющего клина) с целью обнаруженнн наиболее водообильных зон в закарстованных породах
Спаренный водозабор	Целесообразно применять на месторождениях подземных вод со сложными гидрогеохнмическими условиямн, когда пресные воды продуктивного водоносного горизонта подстилаются подземными водами высокой минерализации (например, на лннзах пресных вод), располагая эксплуатационные скважины раздельно в продуктивном горнзонте и в водах с высокой минерализацией	На водозаборном участке закладывают две раздельные группы скважин (одна для захвата и отбора пресных подземных вод, а другая для периодического отбора соленых вод с целью предотвращеиия подтягивания соленых вод в горизонт пресных)
Площадный водозабор	Целесообразно применять на различных месторождениях при использованин подземных вод для целей орошенння земель и водоснабжения	Буровые скважины располагают рассредоточенно и относительно равномерно по площади с целью подачи воды непосредственно на поля орошения

Рис. 1. Инфильтрационная каптажная галерея (*а* — план, *б* — разрез).

1 — каптажная галерея; *2* — напорный водовод; *3* — приемный колодец с насосами; *4* — граница долины; *5* — водоносные породы; *6* — водонепроницаемые породы; *7* — уровень подземных вод в естественных условиях. Стрелками дано направленние стока

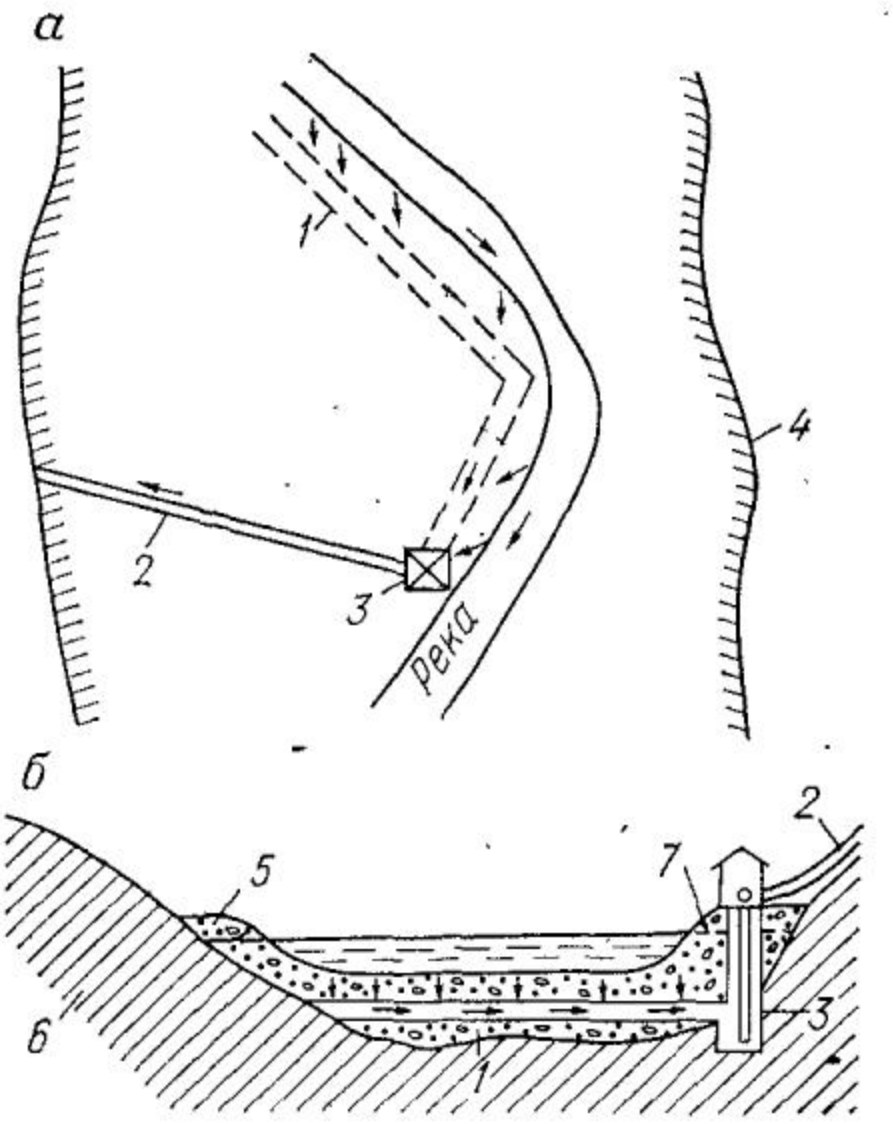


Рис. 2. Лучевой водозабор.

а — план; *б* — одноярусный водозабор; *в* — двухъярусный водозабор. *1* — дренажные лучевые скважины; *2* — приемный шахтный колодец с насосами; *3* — напорный водовод; *4* — водоносные породы; *5* — водонепроницаемые породы; *6* — уровень грунтовых вод. Стрелками дано направление стока

Дренажные горизонтальные скважины для этого типа каптажа задаются непосредственно из ствола приемной шахты в водоносный горизонт протяженностью 20—30, реже 50 м (рис. 2). Дренажные скважины-фильтры при этом целесообразно размещать вдоль берега постоянно действующего поверхностного потока или под руслом реки, чтобы они действовали в условиях береговой или донной инфильтрации поверхностных вод.

Из водозаборов вертикального типа наибольшее распространение в нашей стране получили инфильтрационные каптажные сооружения, когда линейный ряд скважин располагается вдоль береговой зоны поверхностного потока реки или водоема.

В последние годы на территории СССР были выявлены месторождения, на площади которых продуктивные водоносные горизонты имеют мощности до 300 (реже 500) м. При таких гидрогеологических условиях целесообразно задавать так называемые ярусные водозаборы вертикального типа, когда фильтры близко расположенных скважин (на расстоянии 4—5 м) размещаются на различных глубинах (рис. 3).

Применение водозаборов спаренного типа (рис. 4) даст возможность путем регулирования отбора предотвратить прорыв нижележащих соленых вод в эксплуатационные скважины, отбирающие пресные подземные воды.

Идея использования спаренного водозабора состоит в том, чтобы в процессе длительной эксплуатации периодически (по мере ухудшения качества пресных вод) производить одновременный отбор пресных и соленых вод. При этих условиях на водозаборном участке поверхность раздела двух потоков будет располагаться ниже естественной границы раздела, что позволяет исключить подсос соленых вод. Нижний фильтр в конструкции спаренного водозабора должен играть роль защитной завесы, предотвращающей проникновение «языка» соленых вод в верхние скважины, отбирающие пресную воду. В Советском Союзе водозабор спаренного типа успешно работает на Ясханском месторождении (линзе) пресных подземных вод в Туркмении.

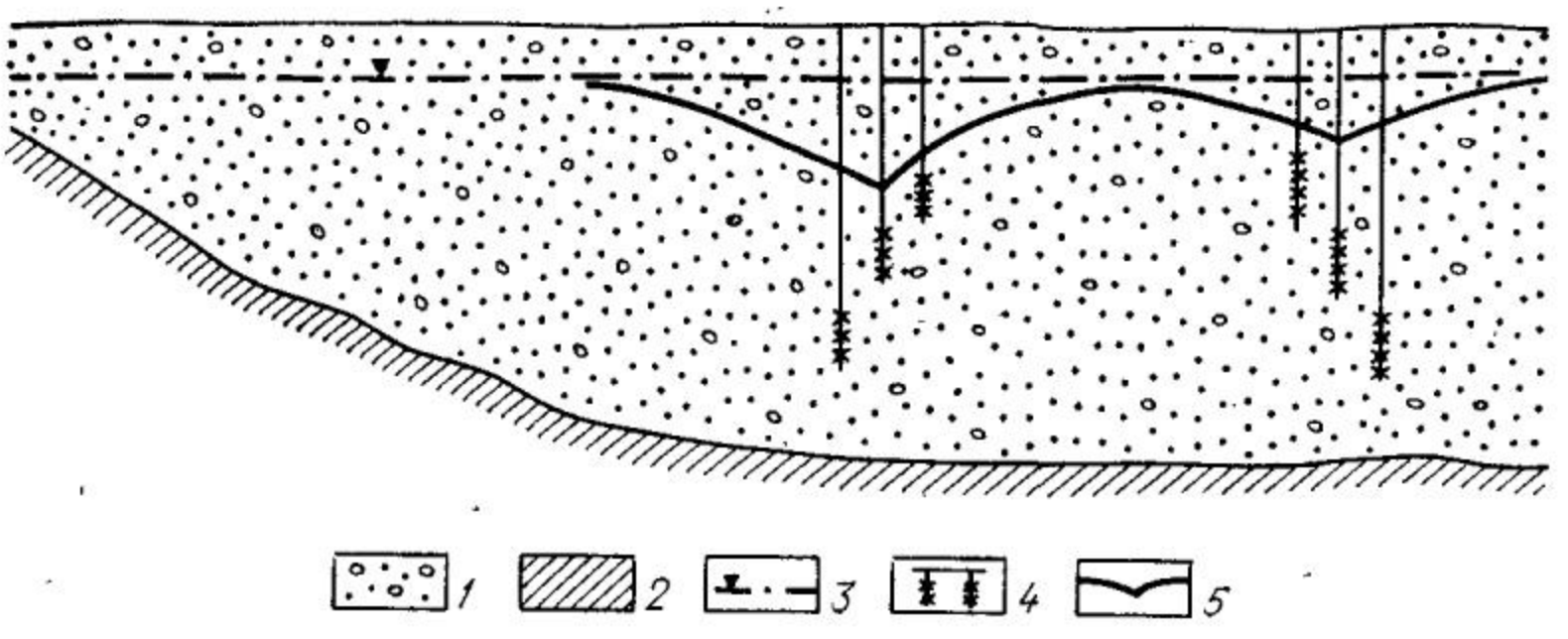


Рис. 3. Взаимодействующие водозаборы ярусного типа.

1 — водоносные породы; *2* — водонепроницаемые породы; *3* — уровень подземных вод; *4* — водозаборные скважины с фильтрами; *5* — депрессионная воронка

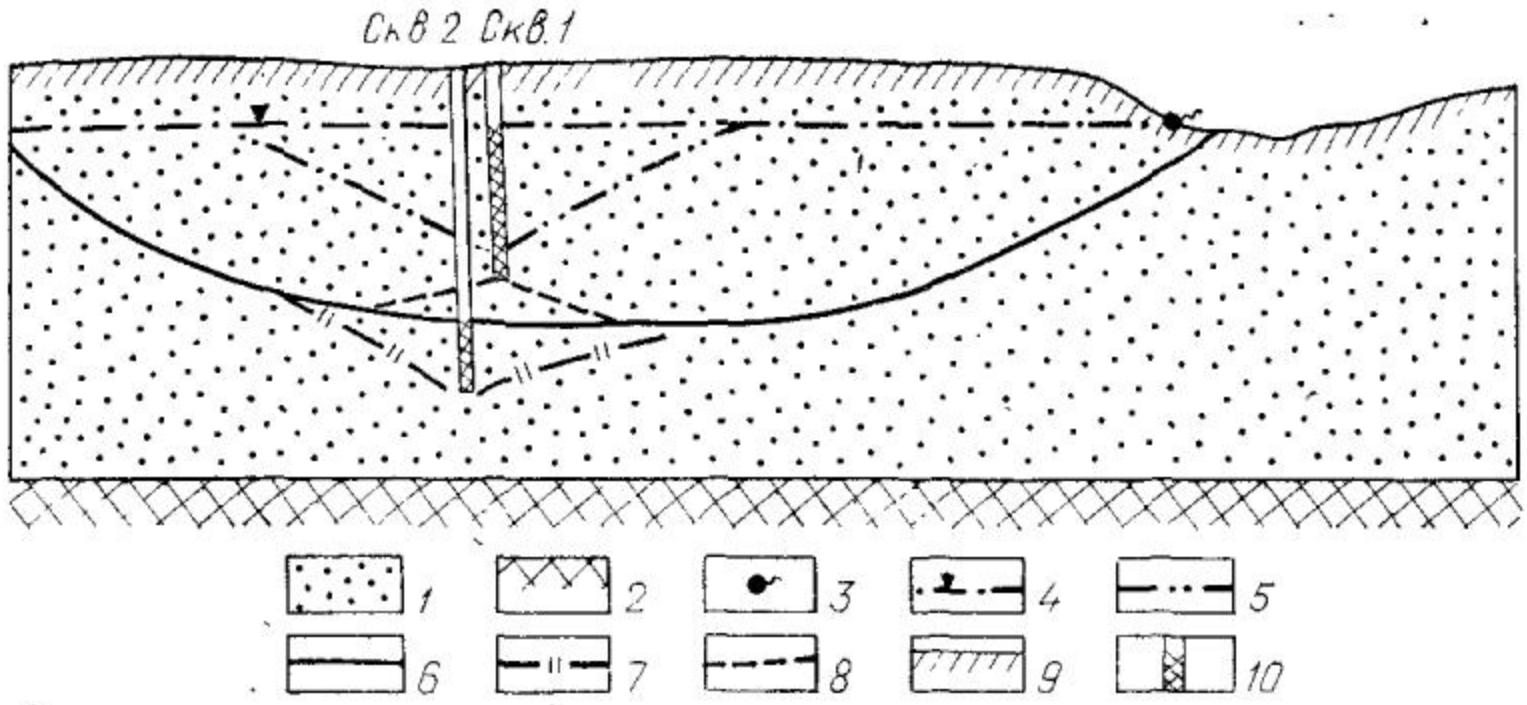


Рис. 4. Схема спаренного водозабора.

1 — водоносные породы; *2* — водонепроницаемые породы; *3* — родники; *4* — уровень пресных подземных вод; *5* — депрессионные воронки в зоне пресных вод; *6* — граница раздела пресных и солевых вод; *7* — депрессия в зоне соленых вод; *8* — контур подтягивания соленых вод; *9* — покровные суглинки; *10* — фильтры водозаборных скважин. Скв. 1 — водозаборная скважина в пресных водах; скв. 2 — водозаборная скважина для каптажа соленых вод

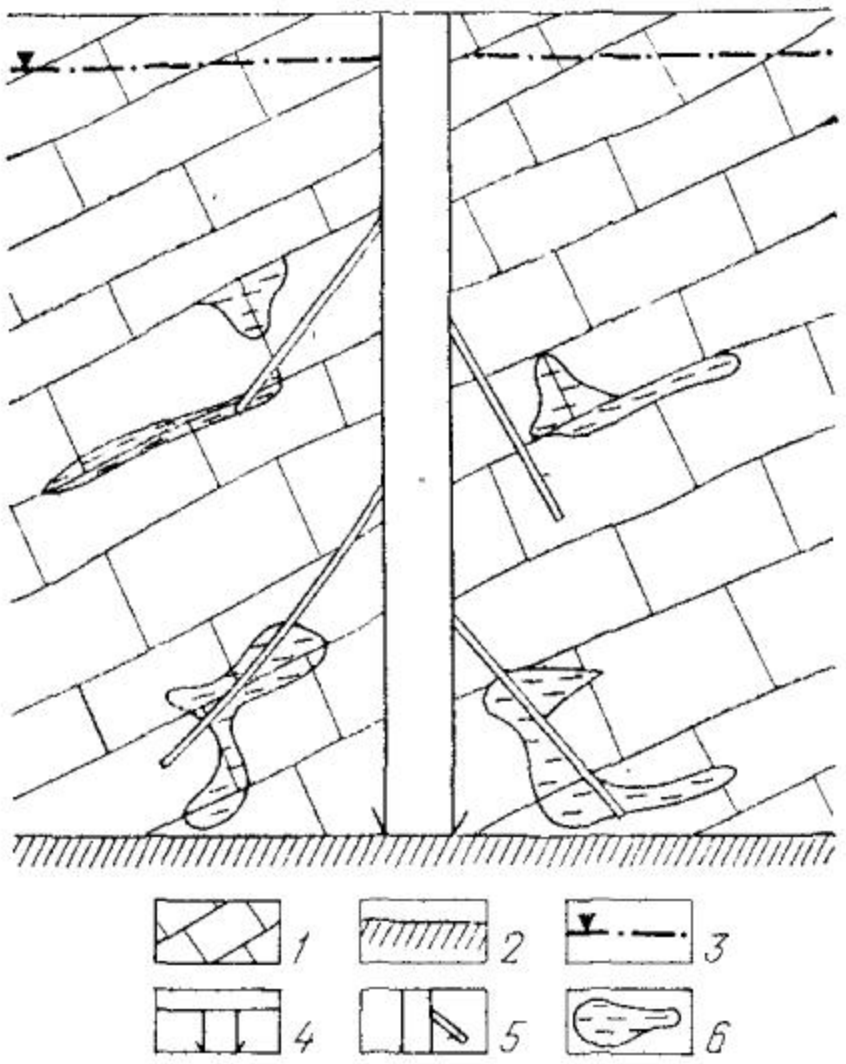


Рис. 5. Конструкция многозабойной скважины.

1 — известняки закарстованные, водоносные; *2* — водонепроницаемые породы; *3* — уровень трещинно-карстовых вод; *4* — основной ствол скважины; *5* — боковые забои скважины; *6* — обводненные зоны

При эксплуатации месторождений трещинно-карстовых вод можно применять водозаборы в виде многозабойных скважин (рис. 5). Основной ствол разведочно-эксплуатационной скважины должен быть пробурен на всю проектную глубину большим диаметром (не менее 250 мм). Для максимального вскрытия обводненных зон в карбонатных породах из основного ствола проходят вспомогательные скважины (меньшим диаметром) с ответвлением их забоев в стороны от оси рабочего ствола в различных направлениях с таким расчетом, чтобы вокруг опытно-эксплуатационной выработки образовалась наиболее активная дренажная зона.

Глава 4

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Завершающим этапом разведочных гидрогеологических работ является подсчет эксплуатационных запасов подземных вод. В связи с этим важным научно-методическим положением по-

исков и разведки подземных вод является понятие о количественных категориях подземных вод и их классификация.

Классификация количественных категорий пресных подземных вод тесным образом связана со следующими основными понятиями: а) объем гравитационной воды, который накапливается в толще пород водоносного горизонта; б) ежегодное питание за счет естественных источников (инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод и конденсационной влаги); в) отбор подземных вод из продуктивного водоносного горизонта техническими средствами для практического использования; г) восполнение подземных вод за счет искусственного источника питания с помощью специальных инженерных сооружений.

Таким образом, в классификационной схеме должно быть отражено то главное, что принципиально отличает пресные подземные воды от всех других твердых и жидких полезных ископаемых, а именно: подвижность подземных вод в недрах Земли и их постоянная возобновляемость, в том числе при эксплуатации. Именно поэтому в классификации должны учитываться такие важнейшие факторы, как объем, расход, питание и отбор подземных вод.

В свое время рядом ученых нашей страны было разработано несколько предложений по классификации количественных категорий подземных вод применительно к требованиям теории и практики.

В 1931 г. П. И. Бутовым была предложена одна из первых классификаций, в которой автор выделил четыре количественных категории запасов пресных подземных вод: 1) общие — формирующиеся на всей площади водоносного горизонта; 2) относительные — то количество подземных вод, которое можно извлечь из пласта водозаборами; 3) пассивные — формирующиеся в течение века в водоносном горизонте; 4) активные — ежегодно возобновляемые под влиянием естественных источников питания.

В 1933 г. Ф. П. Саваренский впервые предложил ввести научное понятие естественные ресурсы подземных вод. Он отмечал, что «емкость водоносного горизонта и запасы подземных вод в нем могут быть невелики, но производительность данного горизонта может быть значительной, если он обеспечен в своем питании. И наоборот, бассейн подземных вод может обладать значительными размерами, но ежегодный приход воды на баланс этого бассейна может оказаться небольшим <...>. Поэтому правильнее говорить не о «запасах» подземных вод, а о «ресурсах» подземных вод, понимая под этим термином обеспечение в одном балансе данного района поступления вод». Естественные запасы, по Ф. П. Саваренскому,— это то количество подземных вод, которое находится в данном бассейне или водоносном пласте и зависит не от поступления и расхода воды, а от емкости этого пласта или бассейна.

Таким образом, с физической точки зрения, Ф. П. Саваренский внес четкое и принципиальное различие в понятия «запасы» и «ресурсы подземных вод», которые прежде всего отличаются размерностью этих величин: запасы выражаются объемом подземных вод, а ресурсы — расходом. Принципиальное различие между этими понятиями заключается еще и в количественном их изменении при эксплуатации подземных вод. Естественные запасы подземных вод при отборе их всегда уменьшаются. В безнапорных условиях на водозаборном участке всегда происходит понижение уровня воды и, следовательно, уменьшение емкости водоносного горизонта; в напорных условиях происходят понижение пьезометрического уровня и, как следствие этого, потери упругой емкости пласта в результате снятия пластового давления. При эксплуатации подземных вод в ряде случаев, как справедливо указывает Н. Н. Биндеман, происходит улучшение их питания. Именно такие гидрогеологические условия могут наблюдаться, например, при эксплуатации грунтовах вод в речных долинах, происходит улучшение условий питания водоносного горизонта вследствие инфильтрации грунтовых вод в речных долинах, происходит улучшение первая классификация эксплуатационных запасов подземных вод и введено в практику утверждение в ГКЗ СССР разведанных запасов пресных подземных вод. В связи с этим в Инструкции по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод и месторождениям пресных подземных вод, утвержденной ГКЗ СССР, было введено новое научное понятие — эксплуатационные запасы пресных подземных вод. В новой, действующей в настоящее время классификации, приводится следующая формулировка этого понятия: «Под эксплуатационными запасами понимается количество подземных вод, которое может быть получено на месторождении с помощью рациональных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям в течение расчетного срока водопотребления».

Эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборном участке могут формироваться за счет самых различных источников — естественных запасов и ресурсов, привлекаемых запасов и искусственных ресурсов. Именно поэтому в процессе разведки очень важно определить и оценить на каждом месторождении источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

Из этого понятия также следует, что эксплуатационные запасы пресных подземных вод оцениваются не вообще, а только применительно к участку каптажного сооружения, при этом схема водозабора должна быть оправдана в технико-экономическом отношении в зависимости от конкретных гидрогеологических условий.

В интересах теории и практики возникла необходимость вы-

делить в классификационных схемах такие категории, как привлекаемые ресурсы, искусственные запасы и искусственные ресурсы, а также упругие запасы.

В табл. 3 представлена в обобщенном виде классификация количественных категорий пресных подземных вод. В ней отражены условия формирования различных видов запасов и ресурсов пресных подземных вод в природных и техногенных условиях. Как видно из схемы, в условиях ненарушенного залегания по генетическим признакам выделяются естественные запасы.

Таблица 3. Классификация количественных категорий пресных подземных вод применительно к их поискам и разведке

Условия	Количественные категории пресных подземных вод	
	Ресурсы	Запасы
Естественные	Естественные	Естественные
Эксплуатация	Прогнозные (категория Р)	Эксплуатационные — разведанные (категории А, В, C_1) и предварнтельно оцененные (категория C_2)
Искусственное восполнение	Искусственные	Искусственные

Под естественными ресурсами понимается величина питания водоносного горизонта в ненарушенных эксплуатацией подземных вод гидрогеологических условиях. Естественные ресурсы складываются из всех приходных элементов баланса водоносного горизонта: инфильтрации атмосферных осадков, привлечения вод поверхностных водотоков и водоемов, перетекания из смежных водоносных горизонтов, притока подземных вод по водоносному горизонту из смежных геологических структур и др. Естественные ресурсы могут быть оценены и по сумме всех расходных элементов баланса водоносного горизонта: испарения, родникового стока, подземного стока в реки, оттока подземных вод по водоносному горизонту за пределы месторождения и др.

Величина естественных ресурсов может изменяться по сезонам года и в течение нескольких лет в зависимости от интенсивности питания водоносного горизонта. Средняя многолетняя величина питания подземных вод за вычетом испарений равна величине подземного стока. Именно поэтому при региональных оценках естественные ресурсы подземных вод часто выра-

жаются среднегодовыми или минимальными значениями модуля подземного стока.

В нарушенных эксплуатацией подземных вод гидрогеологических условиях, как отмечалось выше, питание водоносного горизонта может возрастать в результате улучшения условий инфильтрации атмосферных осадков, уменьшения испарения с поверхности грунтовых вод и транспирации и т. д.

Под естественными запасами понимается объем гравитационной воды, заполняющей поры, трещины и карстовые пустоты в водовмещающих породах. В напорном водоносном горизонте выделяются упругие естественные запасы — объем воды, высвобождающейся при вскрытии водоносного пласта без его осушения и снижения в нем пластового давления (при откачке или самоизливе скважин) в результате объемного расширения воды и уменьшения порового пространства самого пласта.

Естественные ресурсы подземных вод являются важнейшим источником формирования эксплуатационных запасов на конкретных водозаборных участках, поэтому данные о таких ресурсах, полученные при разведке месторождений подземных вод, часто являются основным показателем эксплуатационной возможности того или иного объекта.

На многих месторождениях естественные запасы и ресурсы подземных вод являются основными источниками формирования эксплуатационных запасов и поэтому играют существенную роль в оценке общей производительности водозаборного сооружения.

Если на водозаборном участке отсутствуют другие источники формирования подземных вод, то эксплуатационные запасы $Q_{эз}$ можно определить по формуле:

$$Q_{эз} = Q_{ер}\alpha + \frac{V_{ез}}{T}\alpha_1,$$

где $Q_{ер}$ — естественные ресурсы подземных вод; $V_{ез}$ — естественные запасы подземных вод; T — время эксплуатации; α и α_1 — коэффициенты извлечения ресурсов и запасов подземных вод.

Понятие эксплуатационные запасы является определяющим звеном в построении общей схемы классификации количественных категорий подземных вод.

В соответствии с классификацией, утвержденной ГКЗ СССР в 1983 г., эксплуатационные запасы подземных вод по степени изученности подразделяются на две группы: а) разведанные (категории А, В, C_1) и предварительно оцененные (категория C_2; б) прогнозные ресурсы — подземных вод по степени обоснованности относятся к категории Р. Условия отнесения разведанных запасов подземных вод к той или иной категории достоверности рассмотрены в главе 15.

На площади некоторых месторождений эксплуатационные

запасы могут формироваться за счет так называемых привлекаемых ресурсов подземных вод, т. е. того количества подземных вод, которое формируется в продуктивном горизонте на площади водозаборного участка не в естественных условиях, а непосредственно в процессе эксплуатации водозаборного сооружения.

Естественные запасы подземных вод могут быть извлечены из недр только при осушении продуктивного горизонта, а упругие запасы — при снижении пластового давления (пьезометрического уровня) в напорном водоносном горизонте.

Естественные ресурсы подземных вод, характеризующие все приходные или расходные статьи баланса водоносного горизонта, извлекаются из недр одновременно с естественными запасами. Привлекаемые ресурсы формируются в продуктивном горизонте только при эксплуатации водозаборного сооружения.

Рассматривая научные основы классификации количественных категорий пресных подземных вод Н. Н. Биндеман и Л. С. Язвин (1970 г.) справедливо подчеркивают огромное влияние окружающей среды на формирование эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках. Это влияние очень быстро проявляется на границах продуктивного водоносного горизонта непосредственно в процессе эксплуатации. Именно характер граничных условий фильтрационного потока в плане и разрезе определяет степень возобновляемости и условия привлечения дополнительных ресурсов подземных вод, кроме того, от граничных условий зависит изменение во времени величины запасов. В связи с этим в процессе разведки подземных вод большое значение имеют изучение и качественная оценка граничных условий продуктивного водоносного горизонта.

Как видно из приведенной схемы (см. табл. 3), в условиях искусственного восполнения подземных вод целесообразно выделить два основных понятия — искусственные запасы и искусственные ресурсы.

Искусственные запасы — это объем гравитационных подземных вод, накапливающихся в горных породах под влиянием техногенных процессов (инженерной деятельности человека). Часто такие запасы подземных вод в недрах Земли создаются методом магазинирования поверхностных вод.

Искусственные ресурсы следует рассматривать как результат деятельности процессов искусственного, дополнительного питания подземных вод, например на действующем водозаборном сооружении. Искусственные ресурсы, как и естественные, имеют размерность расхода в единицу времени. Практика показывает, что искусственные запасы и ресурсы подземных вод могут формироваться методом трансформации поверхностных вод с помощью специально создаваемых инженерных сооружений. Искусственные запасы и ресурсы могут также формироваться в природных емкостях вследствие неизбежных ин-

фильтрационных потерь поверхностных вод из обводнительных или транспортных каналов, на площади водохранилищ и других сооружений.

Эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборных участках связаны со всеми рассмотренными выше количественными категориями следующим общим балансовым уравнением:

$$Q_{эз} = (Q_{ер})\,\alpha + \left(\frac{V_{ез}}{T}\right)\alpha_1 + (Q_{пр})\,\beta + \left(\frac{V_{из}}{T}\right)\beta_1 + \Delta Q_{пр},$$

где $Q_{пр}$ — искусственные ресурсы; $V_{из}$ — искусственные запасы; β и β_1 — коэффициенты извлечения ресурсов и запасов подземных вод.

Приведенное выше уравнение — по существу характеризует общую балансовую структуру эксплуатационных запасов подземных вод, т. е. все возможные источники формирования дебита каптажного сооружения.

При изучении гидрогеологических условий того или иного месторождения использование общего балансового уравнения позволяет четко охарактеризовать основные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод и таким образом определить основное направление проведения разведочных гидрогеологических работ. Это очень важное положение подробно рассмотрено в главах 7, 8, 9.

Раздел II.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 5
СОДЕРЖАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Гидрогеологические основы поисков и разведки пресных подземных вод следует рассматривать как научную базу разведочной гидрогеологии. Она представляет собой совокупность ряда научных и методических положений, основными из которых являются: а) учение о месторождениях пресных подземных вод; б) классификация промышленных типов месторождений пресных подземных вод применительно к различным гидрогеологическим условиям страны; в) закономерности распространения на территории СССР промышленных типов месторождений пресных подземных вод. Эти положения по существу предопределяют общее направление и методику проведения поисково-разведочных гидрогеологических работ для целей крупного водоснабжения.

Как и все другие виды полезных ископаемых, пресные подземные воды в верхней части гидрогеосферы образуют месторождения, в пределах которых обычно и формируется то или иное количество естественных ресурсов и запасов.

Г. Н. Каменский, рассматривая в работе «Поиски и разведка подземных вод» различные формы нахождения подземных вод в природе и связь этих форм с определенными типами водовмещающих структур, отмечал, что те места гидрогеологических структур, в пределах которых концентрируются ресурсы подземных вод, можно было бы назвать *водными месторождениями*. В это понятие Г. Н. Каменский вкладывал особое содержание, отражающее не только форму залегания водоносных пород, но и динамику, и режим вод. Придавая большое значение связи между формой залегания водоносных пород и геологическими структурами в целом, он выделил девять типов водовмещающих структур и рассмотрел некоторые примеры, характеризующие гидрогеологические условия выделенных типов.

Учитывая современный уровень знаний в области региональной гидрогеологии, накопленный опыт разведки и эксплуатации, а также современные запросы практики, вполне правомерно

ввести в разведочную гидрогеологию научное понятие м е с т о р о ж д е н и е п р е с н ы х п о д з е м н ы х в о д.

Это понятие было предложено автором в 1959 г. В дальнейшем формулировка его совершенствовалась и уточнялась. В инструкции ГКЗ СССР [14] приведена следующая формулировка: «Под месторождением подземных вод подразумевается пространственно ограниченная часть водоносной системы, в пределах которой под влиянием естественных или искусственных факторов создаются благоприятные по сравнению с окружающими площадями условия для отбора подземных вод в количестве, достаточном для целевого использования их в народном хозяйстве».

Степень сложности гидрогеологических условий различных типов месторождений пресных подземных вод определяется несколькими факторами: условиями залегания, распространения и строения водоносных горизонтов, изменчивостью мощности и фильтрационных свойств водовмещающих пород, источниками формирования эксплуатационных запасов и гидрогеохимической обстановкой.

Ту часть месторождения подземных вод, где производится непосредственный их отбор для практического использования, можно назвать э к с п л у а т а ц и о н н ы м или в о д о з а б о р н ы м у ч а с т к о м. На больших площадях месторождений подземных вод может быть несколько водозаборных участков. Отсюда следует, что месторождения пресных подземных вод формируются преимущественно в самой верхней части гидрогеосферы, в зоне активного подземного стока. Именно здесь на глубинах в среднем 300—600 м формируется современная зона распространения основных ресурсов пресных подземных вод, участвующих в общем глобальном процессе влагооборота. Наряду с этим в практике гидрогеологических работ были выявлены месторождения пресных подземных вод на больших глубинах (более 800 м), условия формирования которых изучены слабо. Ниже этих глубин, в зоне замедленного подземного стока, в гидрогеосфере формируются подземные воды повышенной минерализации.

Подземные воды являются единственным полезным ископаемым, при эксплуатации которого происходит не только его расходование, но и во многих случаях дополнительное формирование на водозаборном участке, вызванное усилением питания. Не менее важной особенностью пресных подземных вод является возможность отбирать их непрерывно в течение практически неограниченного времени.

Именно поэтому в понятии месторождения пресных подземных вод учитывается не только объем вод, накапливающихся в продуктивном горизонте (как для других полезных ископаемых), но и величина возможного их отбора для непрерывной эксплуатации. Величина отбора определяется не только запасами подземных вод в пласте, но и величиной питания, филь-

трационными свойствами водовмещающих пород и другими факторами.

Месторождения пресных подземных вод, так же как и месторождения всех других полезных ископаемых, имеют условные границы в плане и разрезе, определенные объемы и естественно-исторические условия формирования запасов.

В самом понятии месторождения пресных подземных вод есть некоторая условность. Например, в практике разведки подземных вод на площади крупных артезианских бассейнов или речных долинах не так просто обосновать четкое выделение границ месторождений. В связи с этим в работе [11] совершенно справедливо подчеркивается, что в этих условиях при оценке эксплуатационных запасов подземных вод возникает необходимость учитывать возможное взаимодействие отдельных месторождений между собой в процессе их эксплуатации.

Вместе с этим в природных условиях встречаются такие объекты, границы которых могут быть выделены довольно четко. Это относится, например, к ограниченным водоносным структурам, на площади которых водопроводимость пород продуктивного горизонта значительно может превышать водопроводимость вмещающих пород. Очевидно, в таких гидрогеологических условиях вполне допустимо проведение границ месторождения пресных подземных вод по геологическим границам водовмещающей структуры.

Такой же подход к выделению границ месторождения подземных вод применим и к узким речным долинам, где по бортам долины часто распространены породы с более низкими фильтрационными показателями по сравнению с водовмещающими породами продуктивного горизонта — песчано-галечниковыми аллювиальными образованиями.

Следует отметить, что этот раздел гидрогеологических основ поисков и разведки подземных вод в настоящее время еще недостаточно разработан. В этом направлении поиски более четкого определения научного понятия месторождения пресных подземных вод, в том числе основы выделения границ месторождения, целесообразно продолжать.

Выше подчеркивалось, что практика на данном этапе развития народного хозяйства постоянно требует разрешения проблем водоснабжения крупных объектов. В связи с этим для выбора научно-обоснованного направления поисково-разведочных работ для таких целей целесообразно выделить из всех разновидностей месторождений пресных подземных вод те типы месторождений, которые имеют большое практическое значение, т. е. месторождения промышленного типа.

Месторождения пресных подземных вод промышленного типа — это такие гидрогеологические объекты, которые на практике являются основными поставщиками значительных эксплуатационных запасов при решении проблем централизованного водоснабжения крупных городов,

промышленных центров, горнорудных предприятий, а также проблем орошения крупных массивов земель. Нижний предел эксплуатационных запасов подземных вод для месторождений промышленного типа можно условно принять примерно до 5—8 тыс.м³/сут. Месторождения с эксплуатационными возможностями ниже указанного предела могут быть отнесены к мелким объектам, ресурсы которых могут быть использованы главным образом для децентрализованного водоснабжения мелких населенных пунктов.

К непромышленным типам месторождений подземных вод можно отнести, например, месторождения, распространенные на площади бассейнов трещинно-грунтовых вод зоны выветривания интрузивных, эффузивных, метаморфических и других некарстующихся пород. Исследования показывают, что на площади таких бассейнов, где породы обычно обладают низкими фильтрационными показателями, отсутствуют благоприятные геолого-структурные условия для формирования крупных естественных ресурсов и запасов подземных вод. Открытая трещиноватость в них очень быстро затухает с глубиной. Следовательно, в данном случае нет оснований ориентировать разведку подобных месторождений на решение проблемы централизованного водоснабжения крупных объектов.

Это обстоятельство необходимо учитывать при постановке поисково-разведочных гидрогеологических работ. Игнорирование правильной оценки природных условий формирования месторождений может привести к непроизводительным затратам на разведку месторождений подземных вод непромышленного типа. На площади распространения большой группы некарстующихся пород месторождения промышленного типа могут формироваться только в пределах крупных тектонических нарушений, имеющих сравнительно мощные зоны дробления и брекчирования.

Такие месторождения можно назвать месторождениями трещинно-жильного типа — это линейные потоки подземных вод, локализующиеся непосредственно в зонах дробления тектонических нарушений (см. гл. 6).

Методика поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов на месторождениях пресных подземных вод непромышленного типа сравнительно проста и достаточно подробно освещена в ряде монографий и учебников. При наличии общих гидрогеологических данных по тому или иному району, где могут быть распространены мелкие месторождения, сущность их разведки состоит в бурении одной или двух разведочных скважин для непосредственного вскрытия водоносного горизонта. Затем на скважинах, как правило, проводятся опытно-фильтрационные работы, главным образом для установления характера зависимости между дебитом выработки и понижением в ней динамического уровня $Q=f(S)$, а также из скважины производятся обычно не менее чем при двух понижениях уровня.

По характеру зависимости, установленной опытным путем, простыми аналитическими расчетами или графически (путем экстраполяции графика $Q=f(S)$ можно определить максимально возможный дебит разведочной скважины. Если этот дебит удовлетворяет заявленную потребность в воде небольшого хозяйственного объекта, то, по существу, задачу по разведке источника водоснабжения можно считать решенной положительно.

Учитывая, что приемы разведки месторождений подземных вод непромышленного типа просты и достаточно хорошо известны, методика их изучения в настоящем учебном пособии не рассматривается.

Значительно сложнее обстоит дело с методикой разведки и оценки эксплуатационных запасов крупных месторождений подземных вод промышленного типа, которые используются для централизованного водоснабжения. Объясняется это необходимостью: а) отбора из продуктивного горизонта значительных объемов пресных подземных вод крупными водозаборными сооружениями, состоящими, как правило, из целой системы буровых скважин; б) учета взаимодействия между буровыми скважинами внутри системы крупного водозаборного сооружения, а также между крупными водозаборными сооружениями, расположенными на площади месторождения; в) прогнозной оценки влияния интенсивного отбора подземных вод из недр земли на состояние геологической и окружающей среды в целом.

Из этого перечня задач можно сделать вывод, что методика разведки и оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод на месторождениях промышленного типа является весьма сложной и принципиально отличается от изучения мелких объектов; этим проблемам и посвящено настоящее учебное пособие.

Введение в разведочную гидрогеологию понятий *месторождение пресных вод*, и тем более *месторождение промышленного типа* имеет таким образом большое научно-методическое и практическое значение. Эти понятия объединяют комплекс гидрогеологических признаков, а также условия формирования и масштабы использования пресных подземных вод при решении проблем централизованного водоснабжения крупных объектов.

В разрезе месторождения пресных подземных вод могут залегать несколько водоносных горизонтов, а нередко и водоносный комплекс. Однако в числе распространенных на месторождении водоносных горизонтов могут быть такие, в пределах которых по комплексу признаков формируются основные естественные ресурсы и запасы месторождения, а также складываются условия, благоприятные для их отбора. К таким признакам можно отнести: а) мощность водоносного горизонта и литологический состав водовмещающих пород; б) высокие фильтрационные показатели водоносных пород и их относи-

тельно слабую изменчивость в плане и разрезе; в) постоянно действующие источники питания, а также гидравлическую связь водоносных горизонтов с поверхностными водами и т. д.

Водоносные горизонты, которые по ряду гидрогеологических признаков могут быть основными поставщиками эксплуатационных запасов пресных подземных вод на данном объекте при разрешении конкретных проблем централизованного водоснабжения, можно назвать продуктивными.

Выбор под разведку продуктивного водоносного горизонта на месторождении может производиться по результатам анализа материалов ранее проведенных исследований, по опыту эксплуатации действующих водозаборных сооружений или по результатам поисковых работ.

К факторам, определяющим закономерности формирования промышленного типа месторождений подземных вод, можно отнести геолого-структурные, гидрогеологические, геоморфологические, климатические, гидрологические и технические.

Геолого-структурные факторы являются основными, определяющими условия образования и залегания водовмещающих структур, литологический состав водосодержащих и разделяющих горных пород, закономерности формирования фильтрационных и емкостных свойств пород и их пространственную изменчивость, условия взаимосвязи подземных вод различных горизонтов и т. д.

Гидрогеологические факторы обусловливают гидродинамический режим и структуру фильтрационного потока подземных вод, режим отбора (безнапорный, упруговодонапорный), условия питания, естественной разгрузки, формирования химического состава, а также влияние отбора подземных вод на состояние окружающей среды и др.

Геоморфологические факторы определяют для некоторых типов месторождений условия формирования продуктивного водоносного горизонта в плане и разрезе, а также фильтрационных свойств водовмещающих и разделяющих слоев (например, водоносных песчано-галечниковых толщ в речных долинах и конусах выноса).

Гидрологические факторы наиболее существенно определяют условия питания подземных вод в результате инфильтрации поверхностных вод, взаимосвязь поверхностных и подземных вод, а также возможность привлечения поверхностных вод на водозаборном участке.

Климатические факторы определяют естественные условия питания подземных вод за счет инфильтрации атмосферных осадков, естественной разгрузки подземных вод путем испарения, транспирации растительности и т. д.

Технические факторы определяют возможность применения рациональной в технико-экономическом отношении системы эксплуатации пресных подземных вод; учитывающей глубину отбора подземных вод, оптимальный дебит эксплуатацион-

ных скважин, конструктивные особенности каптажного сооружения и др.

Таким образом, формирование промышленных типов месторождений пресных подземных вод является многофакторным процессом, что и учитывается при их классификации.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ГУМИДНОЙ И АРИДНОЙ ОБЛАСТЕЙ

Учитывая различное сочетание перечисленных выше факторов, можно выделить несколько типов крупных месторождений подземных вод, отличающихся методикой проведения поисково-разведочных работ и оценки эксплуатационных запасов.

В табл. 4 приведена классификация промышленных типов месторождений пресных подземных вод для гидрогеологических условий гумидной и аридной зон СССР. Учитывая, что территория этих зон имеет очень сложные и разнообразные гидрогеологические условия, выделенные в табл. 4 типы месторождений следует рассматривать как до некоторой степени обобщающие объекты, имеющие принципиально общие природные условия. Некоторые разновидности этих месторождений могут иметь индивидуальные особенности, отражающие специфику геологоструктурных условий водовмещающих структур, сложность гидрогеологических условий водовмещающих структур, Учесть специфику отдельных месторождений применительно к весьма разнообразным условиям территории СССР в одной классификации очень сложно. Классификация в этом случае может оказаться весьма сложной; чем проще по своей структуре классификация, тем большее значение она может иметь для практики. В связи с этим вполне допустимо считать, что в некоторых регионах нашей страны могут быть выделены дополнительно к рассматриваемой схеме некоторые подтипы или разновидности промышленных типов месторождений пресных подземных вод.

В 1965 г., когда автором впервые была опубликована классификация, в ней по гидродинамическим признакам были выделены две группы промышленных типов месторождений пресных подземных вод: а) с безнапорным режимом уровня; б) с напорным режимом уровня.

В дальнейшем, по мере накопления опыта разведки месторождений и эксплуатации, были уточнены общие закономерности формирования и структура эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках. Практика показала, что в природных условиях часто встречаются месторождения, на площади которых одновременно распространены грунтовые и напорные воды. В разрезе таких месторождений отмечаются двух, трех- и многопластовые водоносные системы, в пределах которых водоносные горизонты, как правило, гидравлически связаны между собой. Отбор подземных вод в таких условиях

Таблица 4. Промышленные типы месторождений подземных вод, распространенных в гумндной н аридной зонах СССР

Типы месторождеиий	Подтипы месторождений	Практическое значение и распространение
1. Речных долин	В широких речных долинах и зандровых равнинах	Имеют исключительно большое значение, являясь главными поставщиками эксплуатационных запасов подземных вод при крупном централизованном водоснабжении (дебиты водозаборов до 6 $м^3/с$); широко распространены на территории СССР
	В узких (до 3 км) речных долинах	Имеют ограниченное значение; дебиты водозаборов 0,25—0,5 $м^3/с$ (реже более 0,5 $м^3/с$); широко распространены на территории СССР
	В погребенных и древних долинах	Имеют ограниченное значение и ограниченное распространение; дебиты водозаборов до 0,3 $м^3/с$ (реже 0,5 $м^3/с$)
2. Трещинно-карстовых вод карбонатных пород	В замкнутых бассейнах, в небольших мульдах (на ограниченной площади)	Имеют большое значение — один из основных поставщиков эксплуатационных запасов подземных вод при централизованном водоснабжении крупных объектов; дебиты водозаборов до 1 $м^3/с$; распространены преимущественно на Урале, в Казахстане и Средней Азии
	В открытых бассейнах (на большой площади распространения карбонатных пород)	Имеют исключительно большое значение — главный поставщик эксплуатационных запасов подземных вод при крупном централизованном водоснабжении (дебиты водозаборов 0,5—3,0 $м^3/с$); имеют ограниченное распространение, главным образом, на территории Казахстана и Средней Азии
3. На площади распространения линз пресных вод	Линзы песчаных массивов пустынной зоны	Имеют большое значение для аридной зоны СССР, особенно пустынных областей; эксплуатационные запасы на водозабориых участках до 0,4 $м^3/с$, распространены ограниченно
	Приканальные линзы	Имеют большое значение для аридной зоны, поскольку формируются вдоль крупных ирригационных каналов; дебиты водозаборов до 15 тыс. $м^3/сут$

4. На площади крупных артезианских бассейнов платформенного типа	Не подразделяются	Имеют большое значение — один из главных поставщиков эксплуатационных запасов подземных вод при централизованном водоснабжении; дебиты одиночных водозаборов до 1,0 м^3/с, групповых до 1,5 м^3/с; распространены, главным образом, на площадях артезианских бассейнов западной и европейской частей СССР
5. На площади артезианских бассейнов горно-складчатых областей	В замкнутых изолированных бассейнах, не имеющих связи с окружающими водоносными структурами	Имеют большое значение; дебиты одиночных водозаборов до 0,5 м^3/с, групповых до 1,0 м^3/с; распространены редко, в горно-складчатых областях Средней Азии, Казахстана, Восточной Сибирн, Кавказа и т. д.
	В открытых бассейнах, имеющих связь с прилегающими водоносными структурами	Имеют большое значение — один из основных поставщиков эксплуатационных запасов при централизованном водоснабжении (дебиты групповых 1,0 м^3/с, реже до 1,5 м^3/с); распространены главным образом в горно-складчатых областях Кавказа, Средней Азии и Казахстана
6. На площади конусов выноса предгорных шлейфов	На площади периферийных конусов выноса	Имеют большое значение; дебиты одиночных водозаборов до 2,0 м^3/с, групповых до 4 м^3/с, реже 5—6 м^3/с; распространены преимущественно в Средней Азии, Казахстане и на Кавказе
	На площади внутридолинных конусов выноса	То же
7. Трещинно-жильных вод зон тектонических нарушенний	В краевых зонах крупных тектонических нарушений сложного строения	Имеют сравнительно небольшое значение и небольшие эксплуатационные возможности; дебиты водозаборов 0,1—0,2 м^3/с, реже до 0,3 м^3/с; распространены во многих горно-складчатых областях СССР
	Во внутрискладчатых зонах тектонических нарушений	Имеют небольшое значение и ограниченное распространение в горно-складчатых областях; дебиты водозаборов 0,05—0,2 м^3/с
8. Флювиогляциальных межморенных четвертичных отложений	Не подразделяются	Имеют большое значение; дебиты водозаборов до 0,5 м^3/с, реже до 1,0 м^3/с; распространены на площади четвертичного оледенения в европейской части СССР

Примечание. Для каждого из типов месторождений выделяются следующие разновидности: А — месторождения с условиями, благоприятными для возобновления запасов и привлечения дополнительных ресурсов при эксплуатации (наличие постоянных водотоков, перетекание между горизонтами); Б — месторождения с неблагоприятными для возобновления запасов условиями и с отсутствием условий для привлечения дополнительных ресурсов при эксплуатации.

приводит к активизации взаимодействия между водоносными горизонтами. Эксплуатационные запасы на таких водозаборах формируются не только за счет естественных ресурсов и запасов продуктивного горизонта, но и в результате привлечения ресурсов смежных водоносных пластов, а нередко и поверхностных вод (см. гл. 21).

В связи с этим потеряло свое принципиальное значение условное выделение в общем комплексе месторождений объектов по гидродинамическим признакам, хотя при этом следует иметь в виду, что месторождения подземных вод с безнапорным и напорным режимами различаются, прежде всего, граничными условиями поверхности водоносных горизонтов. Отличие состоит также в том, что с началом эксплуатации водозабора в безнапорных условиях происходит частичное осушение пласта (т. е. уменьшение мощности водоносного горизонта), в то время как при эксплуатации в условиях напорного режима мощность пласта длительное время остается неизменной (если динамический уровень при эксплуатации не понижается ниже отметки пород кровли горизонта).

Типы месторождений подземных вод в рассматриваемой классификации (см. табл. 4) выделены по геологоструктурным условиям и литологическим признакам, а подтипы — по условиям формирования естественных ресурсов и запасов подземных вод. Разновидности для всех подтипов месторождений выделены по условиям возможного привлечения дополнительных ресурсов при их эксплуатации.

В геолого-гидрогеологическом разрезе для некоторых подтипов месторождений подземных вод речных долин (главным образом, для месторождений в узких речных долинах) могут быть выявлены однослойная или двухслойная среды (рис. 6).

Для некоторых месторождений линз пресных подземных вод аридной зоны характерны сложные гидрогеохимические условия (контакт пресных подземных вод с солеными водами без разделяющих слоев), а для месторождений трещинно-карстовых

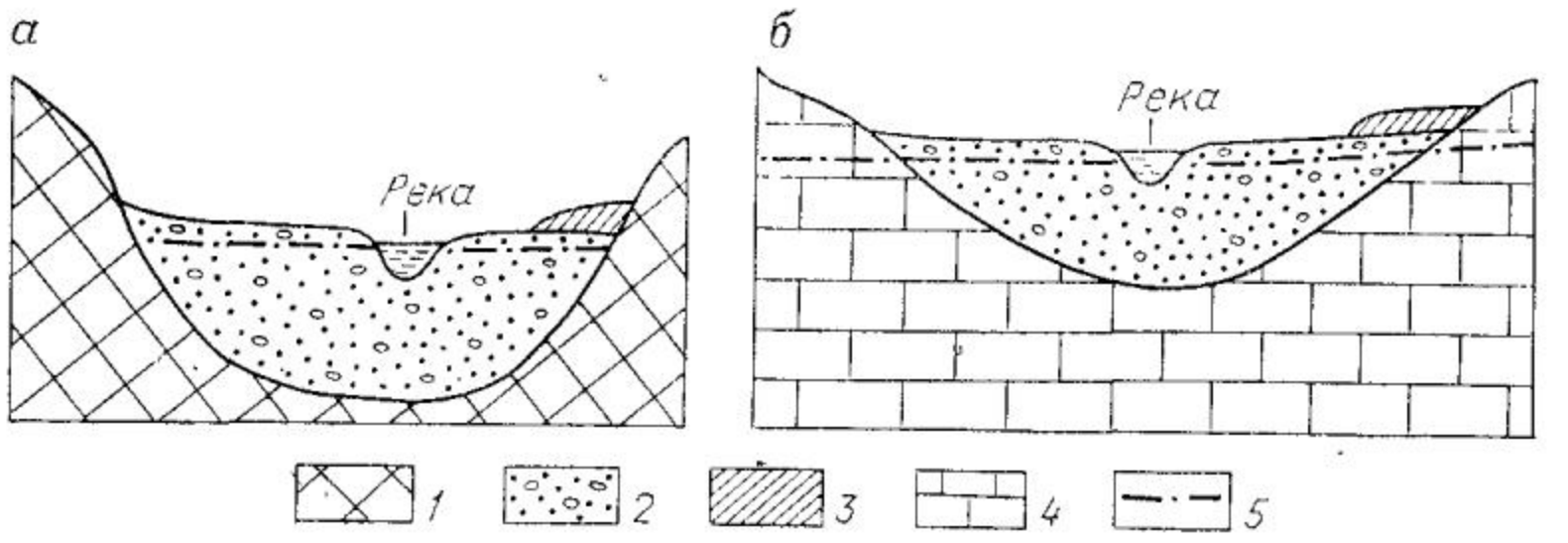


Рис. 6. Схематический разрез речной долины с одним *(а)* и двумя *(б)* водоносными горизонтами.

1 — водонепроницаемые породы; *2* — водоносные песчано-галечниковые аллювиальные образования; *3* — покровные суглинки; *4* — водоносные известняки; *5* — уровень подземных вод

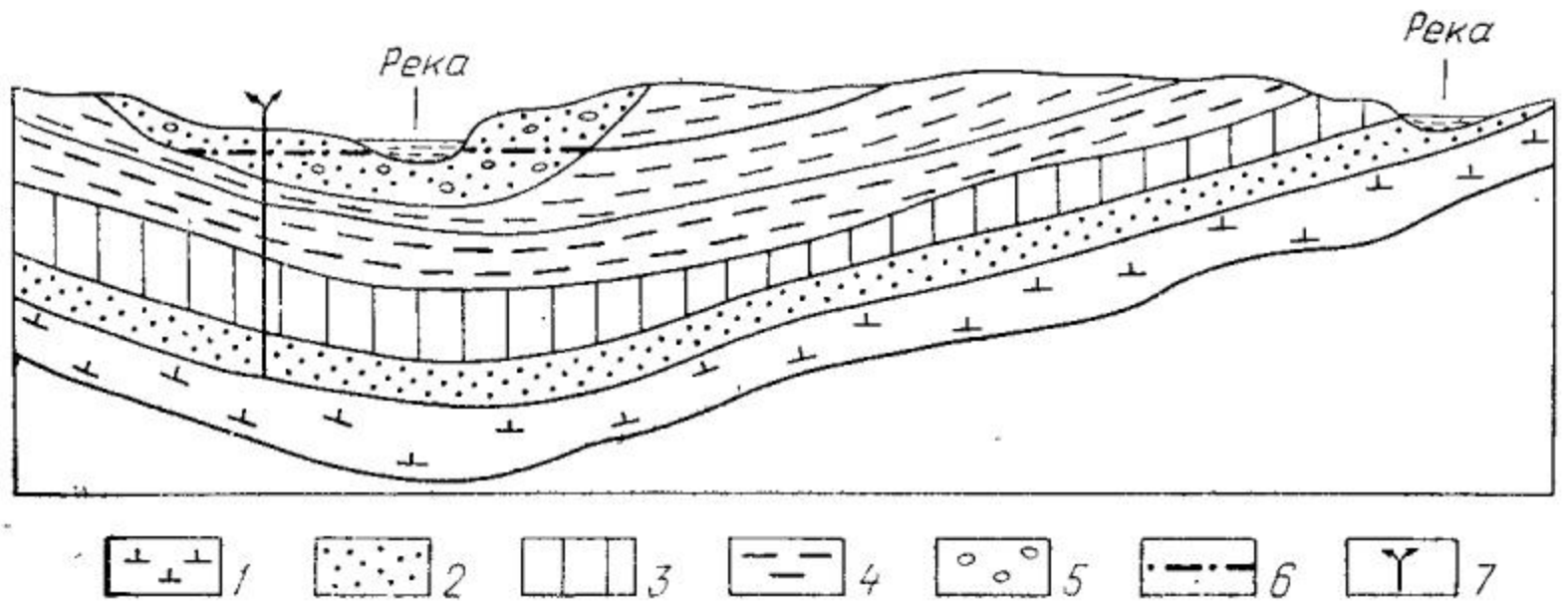


Рис. 7. Схематический разрез сложного месторождения подземных вод.

1 — эффузивные породы; *2* — водоносные пески; *3* — мергели; *4* — глины; *5* — водоносные песчано-галечниковые аллювиальные образования; *6* — уровень грунтовых вод; *7* — фонтанирующая скважина

вод — фильтрационная неоднородность вмещающих пород. Месторождения трещинно-жильных зон принципиально отличаются тем, что в пределах водовмещающих геологических структур формируются не бассейны, а линейно-вытянутые фильтрационные потоки.

Для таких месторождений целесообразно выделить: а) месторождения, приуроченные к крупным, глубоко залегающим тектоническим нарушениям в краевых зонах горно-складчатых областей, которые часто характеризуются не только мощными зонами дробления вмещающих пород, но и сложной системой сопряженных тектонических нарушений; б) месторождения с относительно ограниченными эксплуатационными возможностями, приуроченные к несложным по структуре тектоническим нарушениям во внутрискладчатых областях горных сооружений.

Как отмечалось выше, приведенный в табл. 4 перечень основных промышленных типов подземных вод не исчерпывает всего разнообразия природных гидрогеологических условий на территории СССР. В практике разведочных гидрогеологических работ могут быть выявлены сложные в гидрогеологическом отношении районы, в пределах которых распространено одновременно несколько промышленных типов месторождений подземных вод, например, месторождения безнапорных грунтовых вод аллювиальных отложений речных долин и напорных вод артезианских бассейнов геосинклинального типа (рис. 7).

Практика разведки и опыт эксплуатации показывают, что из месторождений пресных подземных вод, приведенных в табл. 4, наибольшее значение для организации централизованного водоснабжения крупных объектов потребления имеют месторождения подземных вод речных долин, а также на площади артезианских бассейнов платформенного типа и конусов выноса. На долю этих месторождений приходится более 70 % от общего отбора подземных вод в СССР.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Многолетнемерзлые породы занимают около 47 % территории СССР и оказывают существенное влияние на условия формирования естественных ресурсов и запасов подземных вод. К сожалению, эта часть территории страны в мерзлотно-гидрогеологическом отношении изучена пока слабо, хотя в последнее время накоплен некоторый опыт разведки пресных подземных вод, главным образом, в связи со строительством Байкало-Амурской железнодорожной магистрали.

По условиям распространения многолетнемерзлых пород и формирования пресных подземных вод можно выделить две подобласти: а) распространения так называемой сплошной многолетней мерзлоты, где мощность мерзлых пород весьма значительна (до 500 м и более, максимально до 1500 м); б) островного распространения мерзлых горных пород, на площади которых мощность вечной мерзлоты незначительная (менее 100 м).

Для первой подобласти закономерно формирование так называемых таликовых водоносных зон, распространенных под крупными речными долинами, озерами и по зонам крупных тектонических нарушений глубокого заложения. На площади второй подобласти мерзлые породы не оказывают столь существенного влияния на формирование водоносных горизонтов и естественных ресурсов подземных вод, поэтому в пределах ее могут быть распространены некоторые из описанных выше типов подземных вод.

Учитывая специфические мерзлотно-гидрогеологические условия и степень изученности района, в области распространения вечной мерзлоты можно в обобщенном виде выделить три промышленных типа месторождений подземных вод (табл. 5). В классификации учитываются условия формирования подземных вод по отношению к водонепроницаемым многолетнемерзлым породам.

Месторождения подземных вод подрусловых таликовых зон по эксплуатационным возможностям представляют наибольший практический интерес. Этот тип месторождений распространен в долинах крупных современных рек или в котлованах крупных озер, поверхностные потоки которых никогда не промерзают зимой до дна и действуют постоянно.

Выделяются два подтипа месторождений (см. табл. 5). В работе Н. Н. Романовского [29] приводится довольно дробная классификация таликовых зон, которую можно использовать для детализации отдельных типов месторождений.

На месторождениях первого подтипа в результате постоянного теплового воздействия поверхностных вод под руслом реки иногда на большой глубине (до 50 м) образуются талые по-

Таблица 5. Промышленные типы месторождений подземных вод, в области распространения многолетнемерзлых пород

Типы месторождений	Подтипы месторождений	Практическое значение
I. Грунтовых вод песчано-галечниковых аллювиальных отложений на площади подрусловых таликовых зон	В современных речных долинах крупных рек и их притоков или под озерными водоемами с постоянно действующим и непромерзающим до дна поверхностным потоком	Имеют очень большое значение (на базе эксплуатационных запасов месторождений можно решить централизованное водоснабжение крупных объектов потребления), дебит водозаборов до 60 тыс. $м^3$/сут (реже более)
	В пределах древних речных долин с периодически действующим поверхностным потоком и ограниченной площадью таликовой зоны	Для отдельных объектов водоснабжения имеет большое значение с эксплуатационными запасами; дебит водозаборов до 60 тыс. $м^3$/сут, на наиболее крупных месторождениях до 100 тыс. $м^3$/сут
II. Напорных вод на площадн частично промороженных мелкнх артезианскнх бассейнов	На площади мелких водоносных складчатых структур	Могут иметь практическое значение; производительность водозаборов 15 тыс. $м^3$/сут
	На площади частично промороженной трещиноватой зоны выветривания водоносных коренных пород	Имеют ограниченное значение; дебит водозаборов до 8 тыс. $м^3$/сут
III. Напорных трещинно-жильных межмерзлотных подземных вод сквозных таликовых зон крупных тектонических нарушений горно-складчатых областей	Не подразделяются	Имеют ограниченное значение; дебит водозаборов до 8 тыс. $м^3$/сут

роды, и в песчано-галечниковых образованиях формируется подземный поток грунтовых вод. Он, как правило, имеет активную гидравлическую связь с поверхностными водами. Эксплуатация грунтовых вод, приуроченных к подрусловым таликам, на некоторых месторождениях происходит в условиях интенсивной береговой инфильтрации, что в значительной степени повышает производительность каптажа; водозаборные сооружения в таких условиях могут иметь высокую степень обеспеченности, а дебиты отдельных групповых водозаборов достигают 60 тыс.$м^3$/сут.

Месторождения второго подтипа встречаются на площади древних речных долин, имеющих периодический поверхностный

сток в форме паводковых весенних расходов. Таликовая зона на таких месторождениях имеет сравнительно узкий фронт распространения — от 0,5 до 3 км, к которому приурочен фильтрационный поток грунтовых вод, имеющий переменный источник питания. Мощность водоносного горизонта может достигать 200 м. Это довольно значительное по объему природное подземное водохранилище. Особенность эксплуатации подобных месторождении заключается в периодической сработке на водозаборном участке емкостных запасов грунтовых вод с последующим их восполнением в период прохождения паводковых расходов поверхностных вод.

Этот подтип месторождений был открыт при поисках и разведке источника водоснабжения для одного из горнодобывающих предприятий на севере Красноярского края. На базе разведанных эксплуатационных запасов грунтовых вод подрусловых таликов древних долин концентрированным каптажом (обычно это линейный ряд скважин, расположенный по оси древней долины вдоль таликовой зоны) организовано централизованное водоснабжение крупных объектов с общим водопотреблением до 100 тыс.м^3/сут. Особенности разведки и оценки запасов наземных вод месторождений этого подтипа рассмотрены в гл. 23. В последние годы месторождение этого подтипа обнаружено в Читинской области в долине р. Чары, где разведаны довольно крупные запасы пресных подземных вод для водоснабжения Удоканского горнодобывающего предприятия.

Не меньшее практическое значение имеют месторождения пресных подземных вод второго типа, приуроченные к площади мелких частично промороженных артезианских бассейнов.

Как отмечалось, подземные воды на месторождениях второго типа залегают под нижней границей вечной мерзлоты и, как правило, обладают гидростатическими напорами. Глубина залегания напорных подмерзлотных вод колеблется в больших пределах в зависимости от мощности зоны мерзлых пород и изменяется от 40 до 600 м.

Мерзлотно-гидрогеологические условия на месторождениях этого типа предопределяют особенности их разведки и эксплуатации. Здесь необходимо выбирать такую технологию и конструкции буровых скважин, которые предотвращали бы промораживание подземных вод непосредственно в разведочных скважинах, вскрывающих многолетнемерзлые породы.

На больших глубинах ввиду затрудненного водообмена водоносной структуры подмерзлотные воды на некоторых месторождениях имеют повышенную минерализацию и по составу непригодны для хозяйственно-питьевого водоснабжения (минерализация 3—5 г/л и более).

На базе использования эксплуатационных запасов напорных вод малых артезианских бассейнов с суммарной производительностью линейных водозаборов до 15 тыс. м^3/сут можно осуще-

ствлять централизованное хозяйственно-питьевое водоснабжение объектов.

Для южных областей северо-восточной части СССР, где распространена островная вечная мерзлота небольшой мощности, в крупных артезианских бассейнах формируются значительные естественные ресурсы пресных подземных вод. Например, на площади южной части Якутского бассейна мощная зона пресных подземных вод распространена в юрских отложениях. Эти воды вскрыты буровыми скважинами в городах Якутске и Вилюйске, а также в других крупных населенных пунктах. Напорные воды мезозойских отложений на площади этого бассейна широко используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Третий тип промышленных месторождений представлен напорными межмерзлотными водами сквозных таликов, чаще всего приуроченных к зонам крупных тектонических нарушений глубокого заложения. Распространены эти месторождения преимущественно в горно-складчатых областях. В гидрогеологическом отношении межмерзлотные подземные воды сквозных таликов очень часто играют транзитную роль, связывая подмерзлотные подземные воды с надмерзлотными. Этот тип месторождений подземных вод характеризуется наличием линейно-вытянутых потоков. Наиболее часто водоносные сквозные талики можно встретить в области развития мощной толщи вечной мерзлоты, где они являются причиной ее прерывистости на отдельных участках. Напорные межмерзлотные воды аккумулируют в сквозных таликах относительно ограниченные естественные ресурсы: отдельные буровые скважины при разведке имеют дебиты в среднем до 1500 м³/сут, а дебиты водозаборных сооружений могут достигать 8 тыс.м³/сут.

ТИПИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, ПРИВЕДЕННАЯ В ИНСТРУКЦИИ ГКЗ СССР

Изложенная выше классификация месторождений подземных вод промышленного типа (см. табл. 4) принята за основу их типизации, приведенной в Инструкции ГКЗ СССР [14]. В инструкции отмечается, что месторождения питьевых и технических вод* связаны с водоносными горизонтами: 1) в пределах современных и погребенных речных долин; 2) в артезианских бассейнах; 3) в конусах выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин; 4) в структурах и массивах трещинно-карстовых пород и зонах тектонических нарушений; 5) в песчаных массивах пустынь и полупустынь; 6) в надморенных и межморенных водно-ледниковых отложениях; 7) в таликовых зонах области распространения многолетнемерзлых пород.

---

* Месторождения пресных подземных вод, по Н. И. Плотникову.

Такая типизация месторождений в целом правильно отражает основные гидрогеологические особенности условий их формирования и условия их распространения на территории СССР. В предисловии к Инструкции [14] отмечается, что требования ее являются обязательными для выполнения всеми организациями (независимо от их ведомственной подчиненности) при разведке, проектировании водозаборных сооружений и разработке месторождений пресных подземных вод.

Классификация, так же как и типизация месторождений пресных подземных вод, как отмечалось выше, есть обобщающее научное положение, призванное предварительно определять масштабы месторождения, выбор основных направлений поисково-гидрогеологических работ, методики разведки и оценки эксплуатационных запасов. Анализируя эти научно-методические положения, хотелось бы отметить следующее. В Инструкции [14] ко второму типу отнесены месторождения пресных подземных вод, приуроченные к артезианским бассейнам платформенных и горно-складчатых областей. Однако эти месторождения, имеющие некоторые общие условия формирования естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод, различаются своими природными условиями. Так, для артезианских бассейнов платформенных областей гидрогеологические особенности состоят в том, что на их огромной площади формируется месторождение с типичной многопластовой напорной системой, четко выраженной гидродинамической и гидрогеохимической вертикальной зональностью. Кроме того, для водоносных горизонтов, вопреки ранее сложившемуся традиционному представлению о выделении в бассейнах основных областей питания — транзита — разгрузки, отмечаются местные области питания на водораздельных участках речных долин, формирующиеся в результате перетекания грунтовых вод, и местные области разгрузки, приуроченные к долинам рек. Эксплуатационные запасы при этом могут формироваться за счет привлекаемых ресурсов смежных горизонтов и поверхностных вод.

Эти гидрогеологические особенности месторождений напорных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа предопределяют выбор методики разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Артезианские бассейны горно-складчатых областей также имеют гидрогеологические особенности. В межгорных впадинах формируется однопластовая (реже двухпластовая) водоносная система (например, Араратский артезианский бассейн). Для некоторых складчатых структур характерны условия замкнутой балансовой системы, в пределах которой подземные воды имеют скрытую естественную разгрузку в форме площадного испарения (система артезианских бассейнов юго-западных Кызылкумов в Узбекистане, Чу-Сарысуйских артезианских бассейнов в Казахстане и т. д.).

Эти особенности, так же как и в предыдущем случае, обу-

словливают выбор методических приемов изучения месторождений и оценки их эксплуатационных запасов, а также условия промышленного освоения.

В отношении третьего типа, к которому отнесены различные по природным условиям месторождения в конусах выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин, необходимо отметить следующее.

Во-первых, в практике разведки и эксплуатации выявлены месторождения подземных вод, приуроченные к так называемым внутридолинным конусам выноса (Шахимарданское месторождение в Ферганской долине, Сары-Булунское в Чуйской долине и др.) и изученные слабо. Исходя из этого в типизации, приведенной в Инструкции ГКЗ СССР [14], нецелесообразно подчеркивать принадлежность месторождений конусов выноса только к предгорному шлейфу.

Во-вторых, месторождения пресных подземных вод конусов выноса и межгорных впадин имеют гидрогеологические особенности, что определяет выбор методики их разведки и оценки эксплуатационных запасов. Так, на месторождениях конусов выноса формируется довольно сложная многопластовая водоносная система с четко выраженной горизонтальной гидрогеологической зональностью, а на месторождениях пресных подземных вод межгорных впадин такие гидрогеологические условия не встречаются. Подробно отличительные особенности этих двух видов месторождений изложены в гл. 6.

Несколько слов необходимо сказать и о четвертом типе месторождений, приуроченных к структурам и массивам трещинно-карстовых пород и зонам тектонических нарушений. Гидрогеологические условия таких месторождений трещинно-жильных вод тектонических нарушений принципиально отличаются от месторождений трещинно-карстовых вод карбонатных пород. Различие, во-первых, состоит в том, что месторождения, приуроченные к зонам тектонических нарушений, представляют собой узкие линейно-вытянутые потоки трещинно-жильных вод с очень сложными условиями питания, в то время как на площади карбонатных пород формируются бассейны трещинно-карстовых вод. Во-вторых, отличительной особенностью месторождений трещинно-карстовых вод горно-складчатых областей является то, что на них четко прослеживается вертикальная гидродинамическая зональность (см. гл. 6).

Эти особенности двух различных по гидрогеологическим условиям месторождений также предопределяют выбор методики разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод (см. гл. 9).

При выделении типов месторождений подземных вод, распространенных в области многолетнемерзлых пород, в типизации, приведенной в Инструкции [15], не учитываются важные с точки зрения практического использования месторождения подмерзлотных подземных вод частично промороженных арте-

зианских бассейнов. Месторождения этого типа распространены в Восточной Сибири, они отличаются от месторождений, расположенных в таликовых зонах. Поэтому в типизации, использованной в Инструкции ГКЗ СССР [14], было бы целесообразно выделить эти месторождения в самостоятельный тип.

Представляется целесообразным и внесение в класификацию месторождений пресных подземных вод, формирующихся в виде подканальных линз. В связи с интенсивным строительством в нашей стране крупных ирригационных и транспортных каналов месторождения грунтовых вод этого вида получили широкое распространение и имеют определенное практическое значение.

Таким образом, с целью дальнейшего совершенствования типизации месторождений пресных подземных вод, приведенной в Инструкции [15], необходимо продолжить исследования.

Глава 6
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ...НЫХ ДОЛИН

Из всех промышленных типов месторождений подземных вод на территории СССР наибольшим распространением пользуются месторождения первого типа (см. табл. 4), представленные преимущественно грунтовыми водами песчано-галечниковых аллювиальных отложений речных долин.

Типичные месторождения первого подтипа (см. табл. 4) распространены преимущественно в областях краевых прогибов геосинклинальных зон или в крупных межгорных котловинах, где они имеют широкий фронт фильтрационного потока (рис. 8) (в Средней Азии, реже в Казахстане и в Закавказье).

В геоморфологическом отношении для месторождений этого подтипа характерно наличие четко выраженных в поперечном сечении молодых и древних террас рек. Так, в долинах рек Чирчика и Ангрена (в Узбекистане) прослеживается более 11 террасовых поверхностей. Ширина общего фронта подземного стока грунтовых вод на площади этих долин достигает 18 км, причем на долю пойменной террасы, периодически затопляемой паводковыми водами, приходится до 7 км (долина р. Ангрен). Общая мощность водоносных песчано-галечниковых аллювиальных образований в долине р. Ангрен достигает 250 м, из них наиболее хорошо водопроницаемая часть разреза галечников составляет от 80 до 100 м с коэффициентом фильтрации от 60 до 120 м/сут. Нижние горизонты галечников очень уплотнены

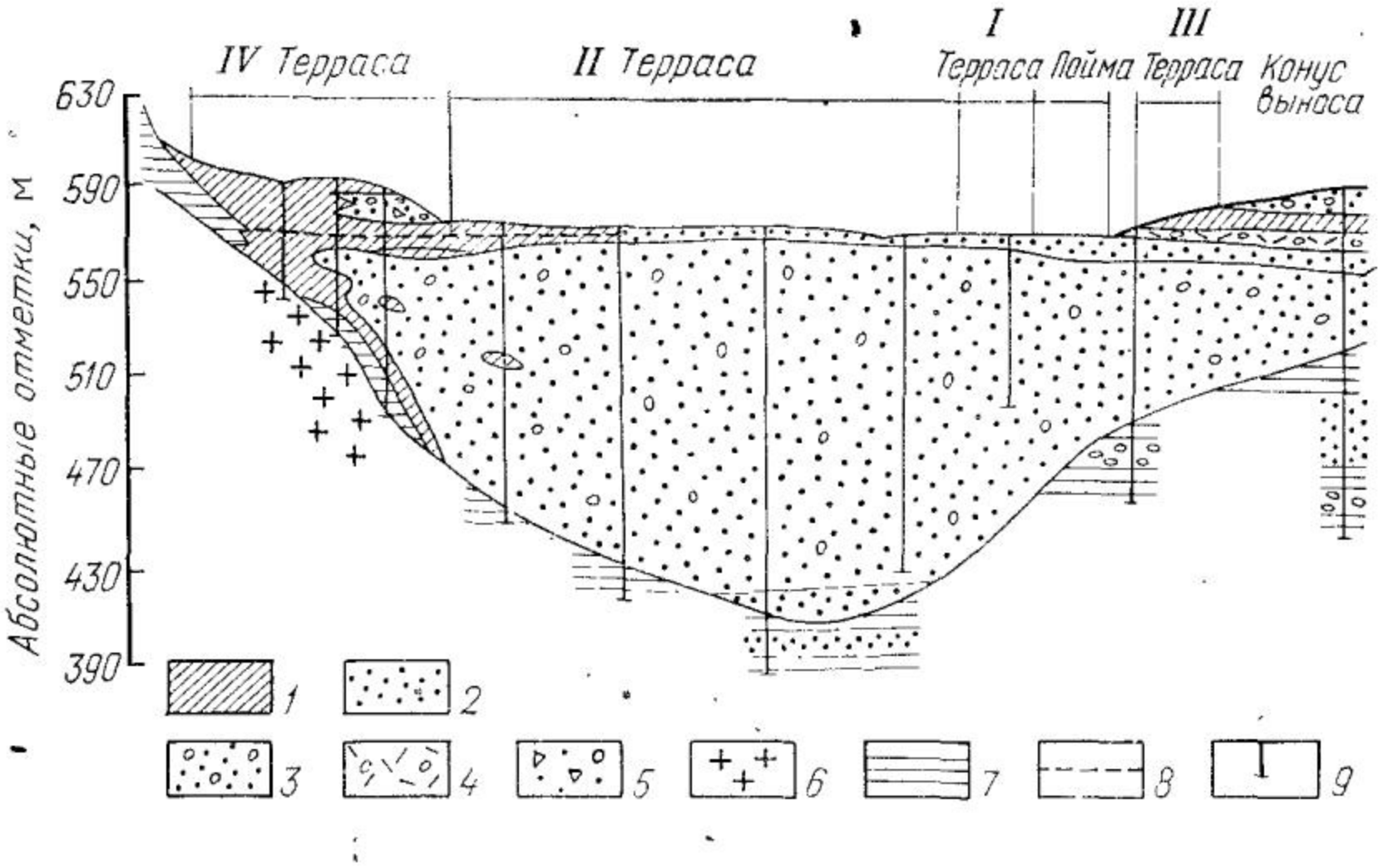


Рис. 8. Месторождения грунтовых вод аллювиальных отложений широких речных долнн.

1 — суглиики; *2* — пески; *3* — галечники; *4* — галечники с суглинками; *5* — песок с валунами; *6* — порфириты; *7* — глиины; *8* — уровень грунтовых вод; *9* — скважины

(местами до состояния конгломератов) и отличаются пониженными фильтрационными показателями (коэффициент фильтрации изменяется от 0,5 до 2 м/сут). Такая зональность фильтрационных свойств галечников в вертикальном разрезе очень характерна для месторождений описываемого типа.

Производительность естественного потока грунтовых вод в поперечном сечении широких речных долин в некоторых случаях достигает 9 м^3/с. Естественные запасы в мощной толще галечниковых образований формируют по существу огромное естественное водохранилище подземных вод.

С целью удовлетворения потребности централизованного водоснабжения крупных промышленных центров на базе разведанных и утвержденных в ГКЗ СССР эксплуатационных запасов грунтовых вод широких речных долин в Средней Азии находятся в эксплуатации крупные водозаборные сооружения производительностью до 860 тыс. м^3/сут каждый. Аналогичные месторождения выявлены в предгорной части долины р. Иртыша и в бассейне слившихся долин и конусов выноса рек Арыса, Бадама, Сайрама и др. (Казахстан), в долине р. Чу и на побережье Иссык-Куля (Киргизия). Крупные месторождения выявлены и на Северном Кавказе (в долине р. Терек и др.).

Этот подтип месторождений грунтовых вод целесообразно назвать среднеазиатским (впервые открыты и разведаны они были в Средней Азии). Основными характерными гидрогеологическими признаками их являются: 1) наличие мощной толщи водоносных песчано-галечниковых образований (до 400 м)

и широкого фронта распространения естественного потока грунтовых вод (более 15 км); 2) присутствие вертикальной зональности фильтрационных свойств водоносных галечников, при которой отмечается постепенное ухудшение их водопроницаемости с увеличением глубины; 3) относительно близкое залегание грунтовых вод от поверхности (на площади распространения молодых террас до 3 м, а на древних террасах до 20 м, реже более 20 м); 4) формирование в толще галечников крупных естественных ресурсов и запасов грунтовых вод; 5) активная форма гидравлической связи грунтовых вод с речными поверхностными водами.

Последний признак имеет очень важное практическое значение при выяснении возможности привлечения на водозаборах дополнительных эксплуатационных запасов за счет инфильтрации поверхностных вод.

Подземные воды на месторождениях этого типа формируются и пополняются за счет трех основных источников: а) инфильтрации поверхностных речных вод, причем для некоторых речных долин этот источник питания действует не постоянно, а периодически; б) скрытой (подземной) естественной разгрузки трещинных и пластовых вод коренных пород, слагающих основания и коренные борта долин, а также грунтовых вод притоков основной реки; в) инфильтрации атмосферных осадков, выпадающих непосредственно на площади распространения аллювиальных галечниковых образований. Из этих источников питания наиболее существенное значение имеют поверхностные воды реки.

Учитывая основные гидрогеологические признаки и характеристику источников питания, оценку эксплуатационной возможности отдельных водозаборных участков для среднеазиатского типа месторождений в общем виде можно представить следующим балансовым уравнением:

$$Q_{эз} = Q_{ер}\alpha + \frac{V_{ез}}{T}\beta + \Delta Q_{пр}, \qquad (6.1)$$

где $Q_{эз}$ — эксплуатационные запасы отдельных водозаборных участков; $Q_{ер}$ — естественные ресурсы грунтовых вод месторождения; $V_{ез}$ — естественные запасы грунтовых вод на выбранной площади месторождения; T — амортизационный срок эксплуатации водозабора; α, β — коэффициенты извлечения; $\Delta Q_{пр}$ — привлекаемые в процессе эксплуатации дополнительные ресурсы грунтовых вод (за счет береговой инфильтрации поверхностных вод в период эксплуатации водозабора — основного источника формирования эксплуатационных запасов).

Все виды эксплуатационных запасов, характеризующие правую часть уравнения (6.1) для данного типа месторождений, имеют большое практическое значение. Именно поэтому на площади распространения месторождений широких речных до-

лин можно производить разведку отдельных их участков под обоснование различных типов водозаборных сооружений:

а) наиболее производительных водозаборов инфильтрационного типа, дебит которых формируется преимущественно за счет привлекаемых ресурсов (береговая инфильтрация поверхностных вод реки), эксплуатационные скважины таких водозаборов обычно проектируются вдоль берега современного русла реки (рис. 9);

б) поперечных водозаборов, когда эксплуатационные скважины (в том числе водозаборные сооружения ярусного типа) на участке каптажа расположены в поперечном сечении речной долины, дебиты скважин при этом формируются за счет естественных ресурсов и запасов, и в меньшей мере привлекаемых ресурсов;

в) рассредоточенных по площади водозаборов, когда эксплуатационные скважины можно располагать отдельными контурными группами в различных гидрогеологических условиях на площади широкого фронта потока грунтовых вод, в том числе вдали от современного русла реки; дебиты скважин таких водозаборов формируются преимущественно за счет использования естественных ресурсов и естественных запасов.

Выбор типа водозаборных сооружений, каждый из которых имеет большое практическое значение, до некоторой степени предопределяют методику разведки этих участков.

Месторождения подземных вод узких речных долин. Месторождения подземных вод этого подтипа встречаются в сравнительно узких речных долинах, где фильтрационный поток в плане ограничивается фронтом 1—2 км, реже 3 км. Как показывает практика разведки и эксплуатации, такие месторождения могут иметь большое промышленное значение только при наличии в долине постоянно действующих поверхностных водотоков, т. е. условий формирования дополнительных ресурсов подземных вод, привлекаемых в процессе эксплуатации инфильтрационного водозабора. Суммарный дебит водозабора в этом

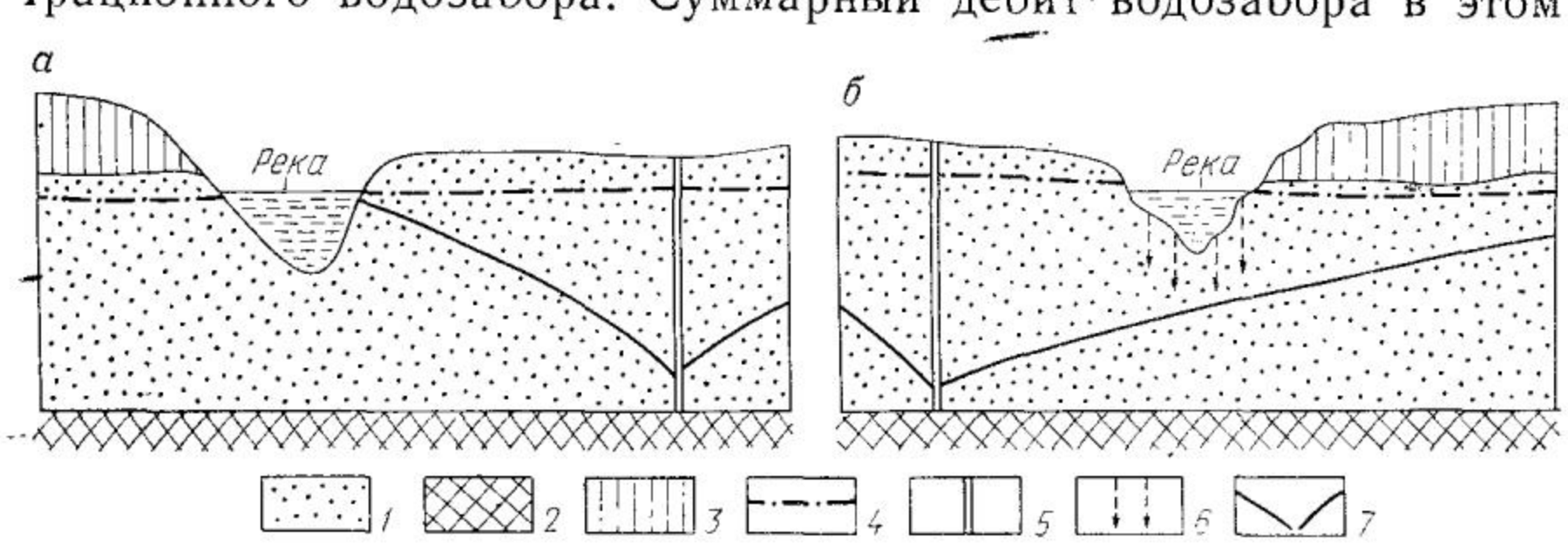


Рис. 9. Формы гидравлической связи подземных и поверхностных вод в речных долинах.

Режим фильтрации: *а* — подпертый; *б* — свободный. *1* — водоносные породы (пески); *2* — водонепроницаемые породы; *3* — покровные суглинки; *4* — уровень грунтовых вод в естественных условиях; *5* — скважина; *6* — фильтрация в форме капежа; *7* — депрессионная воронка

случае может достигать 250 тыс.м³/сут. Если на площади месторождений отсутствуют постоянно действующие поверхностные водотоки, то промышленная ценность их резко снижается (известны водозаборные сооружения производительностью до 30 тыс. м³/сут).

Для практики организации водоснабжения весьма важно то, что месторождения подземных вод этого подтипа на территории СССР очень широко распространены в различных гидрогеологических областях и зонах (в европейской части СССР и Сибири, на Дальнем Востоке и Кавказе, в республиках Средней Азии, Прибалтике и Казахстане).

Водовмещающими породами на площади месторождений второго подтипа чаще всего являются аллювиальные песчано-галечниковые или песчано-гравелистые образования. Мощность их обычно незначительная и в среднем изменяется от 12 до 25 м, достигая иногда 60 м. К этим образованиям долин обычно приурочены грунтовые воды, залегающие в форме подземного потока. Поток в большинстве случаев имеет тесную гидравлическую связь с поверхностными речными водами.

Из всего разнообразия геолого-структурных и гидрогеологических условий можно выделить две разновидности речных долин, на площади которых: 1) водовмещающие аллювиальные песчано-галечниковые отложения залегают непосредственно на практически водонепроницаемых породах; 2) песчано-галечниковые образования на всей площади или на отдельных ее участках подстилаются водоносными породами, обладающими высокими коллекторскими свойствами (например, залегание аллювиальных образований на карбонатных закарстованных водоносных породах (см. рис. 6).

В этих случаях в эксплуатацию могут быть вовлечены оба водоносных горизонта или только нижний (если аллювиальные образования обладают низкими фильтрационными показателями). Такое различие в гидрогеологических условиях месторождений второго подтипа предопределяет и выбор общего направления разведочных работ. Так, для первой разновидности месторождений узких речных долин гидрогеологические исследования целесообразно направить в первую очередь на изучение условий создания водозабора инфильтрационного типа с целью наиболее эффективного захвата естественных и привлекаемых ресурсов. Для второй разновидности целесообразно привлечь к эксплуатации оба водоносных горизонта, особенно в том случае, когда в долине поверхностный поток действует периодически. Гидрогеологические работы в этих условиях целесообразно направить на разведку двух водоносных горизонтов с целью обоснования строительства концентрированного водозабора. Подземные воды месторождений могут иметь два основных вида питания за счет инфильтрации: а) атмосферных осадков, б) поверхностных вод.

При наличии в речной долине постоянно действующего по-

тока эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборном участке формируются преимущественно за счет привлекаемых ресурсов. Если поверхностные воды в речной долине действуют периодически, эксплуатационные запасы формируются за счет естественных ресурсов и запасов (с учетом периодического их возобновления).

Учитывая изложенное выше, можно отметить следующие характерные гидрогеологические признаки месторождений подземных вод второго подтипа: 1) формирование в аллювиальных песчано-галечниковых образованиях естественного потока грунтовых вод, имеющего сравнительно узкий фронт (в среднем от 1 до 2, реже 3 км); 2) незначительная мощность водоносного горизонта (в среднем 40—60 м); 3) высокие и относительно однородные коллекторские свойства водовмещающих пород в верхней и средней частях речных долин (в нижней части долин наблюдается заметное ухудшение фильтрационных свойств пород и их неоднородность в плане и в разрезе); 4) активная форма гидравлической связи подземных вод с поверхностными речными водами, что при наличии постоянно действующих водотоков создает благоприятные условия для привлечения дополнительных ресурсов подземных вод; 5) в некоторых случаях на месторождении возможно формирование двух водоносных горизонтов, что также повышает эксплуатационные возможности месторождения; 6) широкое распространение на территории СССР как в горно-складчатых, так и в платформенных областях. Все это определяет возможность применения сравнительно простых методов поисков, разведки и оценки эксплуатационных запасов таких месторождений.

Месторождения подземных вод погребенных и древних речных долин (см. табл. 4). По условиям формирования эксплуатационных запасов наиболее характерные в этом отношении месторождения распространены в Казахстане (например, в древних долинах рек Джон, Сарысу, Джаман-Сарысу, Токрау, Талдык и др.), где отмечаются своеобразные гидрогеологические условия. На рис. 10 представлен схематический разрез древней долины р. Джона. Ширина долины достигает здесь 25 км, мощность водоносных отложений в среднем изменяется от 12 до 15 м, достигая на некоторых участках 30 м. Грунтовые воды получают за счет инфильтрации: а) выпадающих атмосферных осадков, б) многолетних паводковых расходов поверхностных вод р. Чурубай Нуры, которые затапливают долины один раз в 7, 10 или 13 лет. В гидрогеологическом отношении такие древние долины можно рассматривать как огромные (по площади и емкости) естественные подземные хранилища грунтовых вод с весьма крупными естественными запасами (до 1 млрд. $м^3$). Эти природные водохранилища грунтовых вод, как показывают данные разведки, могут иметь полезную водоотдачу до 1 $м^3/с$ на тридцатилетний срок эксплуатации площадных водозаборных сооружений.

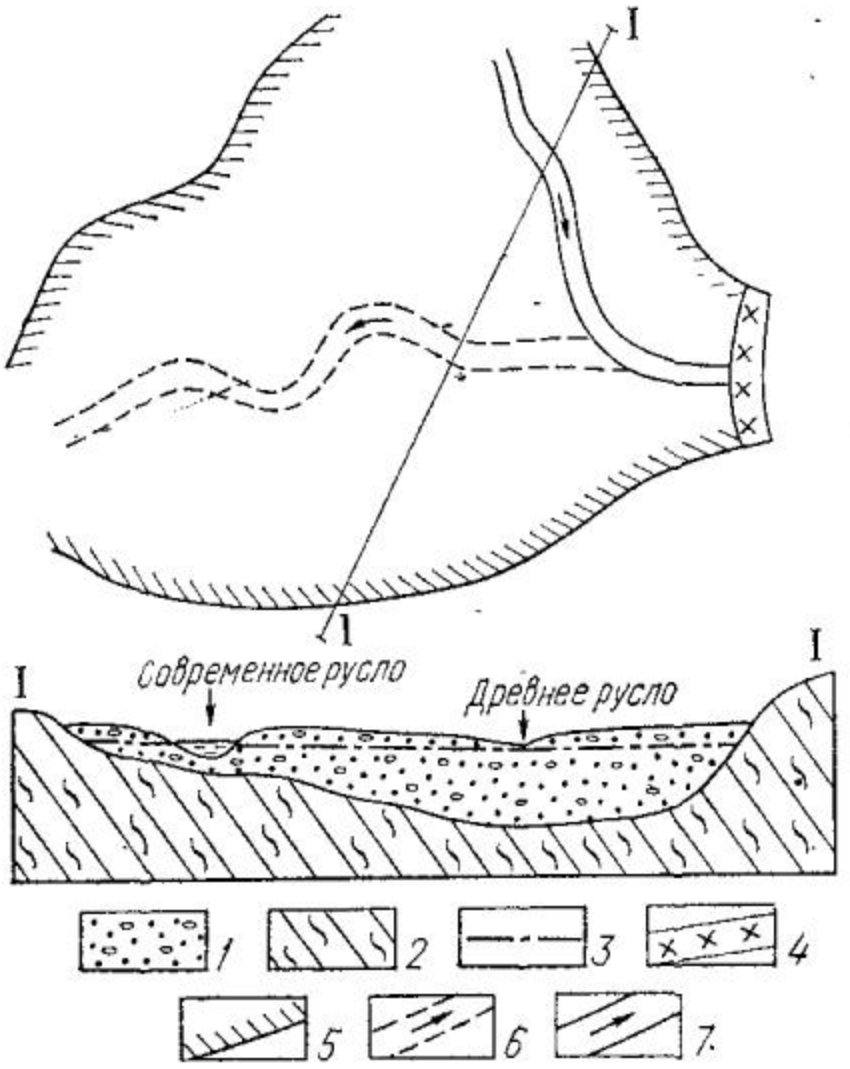


Рис. 10. Древняя долина р. Джона.
1 — песчано-гравелистые аллювиальные образования; *2* — водонепроницаемые глинистые сланцы; *3* — статический уровень подземных вод; *4* — плотина; *5* — контуры древней долины; *6* — древнее русло; *7* — современное русло

Некоторые древние долины Казахстана характеризуются сложными гидрохимическими условиями. Многолетние максимальные паводковые расходы поверхностных вод, относительно широко разливаясь на площади древней долины, благоприятны для восполнения запасов грунтовых вод за счет инфильтрации поверхностных вод. Такой режим основного источника питания отражается на формировании химического состава грунтовых вод. В центральной части поперечного сечения потока, где заметно инфильтрационное влияние весенних паводков, обычно скапливаются пресные грунтовые воды с общей минерализацией до 1 г/л. В краевых частях подземного потока и на некоторой глубине, доля фильтрационного питания грунтовых вод паводковыми водами снижается. Под влиянием неравномерного режима питания и интенсивного испарения грунтовые воды здесь приобретают повышенную общую минерализацию до 5 г/л, а иногда и более.

Среди древних долин выделяются разновидности уральского и европейского типов. Например, древняя долина р. Сакмары на Урале смещена по сравнению с современным руслом, древнее русло более глубоко врезано в поверхность коренных пород. Мощность песчано-галечниковых отложений на отрезке древнего эрозионного вреза достигает 80 м, что в несколько раз превышает их мощность в современной долине (10—15 м). Грунтовые воды, приуроченные к древней долине, питаются за счет инфильтрации поверхностных вод со стороны современного русла и скрытого дренирования трещинных вод коренных пород. Большая мощность водоносного горизонта в древней части долины и связь грунтовых вод с поверхностными благоприятны для размещения водозаборного сооружения в виде линейного ряда скважин вдоль погребенного древнего русла.

В европейской части СССР месторождения грунтовых вод описываемого подтипа встречаются в области распространения ледниковых отложений. Древние доледниковые долины здесь глубоко врезаны в толщу коренных отложений и выполнены хорошо проницаемыми мощными песчаными и песчано-галечниковыми отложениями. Такие древние долины выявлены, напри-

мер, на площади Московского артезианского бассейна. Нередко водоносные пески в древних долинах Московского бассейна имеют хорошую гидравлическую связь с напорными водами, приуроченными к известнякам верхнего карбона.

Аллювиальные образования в древних долинах рек европейской части СССР нередко представляют собой аккумуляторы значительных запасов грунтовых вод, которые могут обеспечить расход крупных каптажных сооружений, необходимый для решения проблем централизованного водоснабжения отдельных объектов (водозаборные сооружения с суммарным эксплуатационным дебитом от 20 до 60 тыс.м³/сут).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ ВОД КАРБОНАТНЫХ ПОРОД

Общие условия водоносности карбонатных пород. Большой практический интерес для решения проблем централизованного водоснабжения представляют промышленные месторождения, приуроченные к площади распространения бассейнов трещинно-карстовых вод карбонатных пород.

Среди всех литологических разностей трещиноватых осадочных, метаморфических и изверженных пород карбонатные горные породы (известняки, доломиты, мраморы) обладают самыми высокими коллекторскими свойствами. Именно поэтому в карбонатных породах, как правило, формируются крупные естественные ресурсы и запасы трещинно-карстовых вод. В других литологических разностях осадочных, метаморфических и интрузивных пород промышленных месторождений подземных вод не образуется. Описываемый тип месторождений наиболее характерен для районов горно-складчатых областей, где сложно дислоцированная и обычно мощная толща карбонатных пород распространена в виде линейно-вытянутых складчатых структур, интенсивно тектонически нарушенных по простиранию и падению. В районах платформенных областей месторождения безнапорных трещинно-карстовых вод встречаются сравнительно редко.

В гидрогеологическом отношении карбонатные породы могут быть подразделены на две формации.

Формация карбонатных пород платформенного типа распространена в разрезе верхнего чехла платформы. Породы, весьма слабо дислоцированные и тектонически ненарушенные, имеют горизонтальное залегание с четко выраженной слоистостью. Общая мощность карбонатных пород обычно незначительная (не превышает 250 м). Для платформенных областей отмечается наиболее интенсивное развитие трещиноватости и закарстованности карбонатных пород непосредственно в речных долинах. Поэтому буровые скважины, заложенные в долине реки, при прочих равных условиях всегда имеют повышенную водообильность по сравнению с водораздельными

участками. Более интенсивная трещиноватость и закарстованность карбонатных пород в долинах рек может быть объяснена влиянием развития речной долины на состояние пород: эрозионная деятельность поверхностных вод способствует усилению потенциально заложенной трещиноватости, а затем и закарстованности. Эти гидрогеологические особенности в условиях водоносности карбонатных пород можно использовать как поисковый критерий (см. гл. 8).

Формация карбонатных пород горно-складчатых областей обычно имеет большую площадь распространения, значительные мощности отдельных толщ и отличается сложной дислоцированностью и интенсивной тектонической нарушенностью. В гидрогеологическом отношении она характеризуется сравнительно высокой степенью закарстованности и водообильности.

Условия формирования и накопления подземных вод в карбонатных породах в значительной мере определяются их структурными элементами, т. е. трещиноватостью и закарстованностью, поэтому целесообразно вначале кратко рассмотреть условия образования в известняках среды для циркуляции подземных вод и закономерность ее размещения в толще пород, а затем остановиться на характеристике условия водоносности карбонатных пород.

Как известно, все виды карстовых форм, распространенных в карбонатных породах, подразделяются на поверхностные и подземные. Если в развитии поверхностных карстовых форм (карры, поноры и др.) трещиноватость известняков может иногда играть второстепенную роль, то в образовании подземных карстовых форм (мелкие пустоты, каверны, пещеры, галереи, вертикальные колодцы и др.) первоначальная трещиноватость горных пород имеет ведущее значение. В формировании различных форм подземного карста в карбонатных породах и интенсивности их проявления большую роль играют следующие взаимосвязанные факторы: 1) химическая активность пород; 2) структурные и текстурные особенности карбонатных пород (в первую очередь степень и характер слоистости); 3) степень тектонической нарушенности пород; 4) макропористость и первичная трещиноватость известняков; 5) продолжительность периода активного взаимодействия с подземными водами, под влиянием которого происходит химическое и физическое выветривание карбонатных пород; 6) положение базиса дренажа подземных вод в известняках, определяющего направление и величины стока, а также скорость движения подземных вод. Все эти факторы необходимо учитывать при оценке условий формирования трещиноватости и закарстованности, а также при проведении поисково-разведочных работ на месторождениях трещинно-карстовых вод.

Накопленные материалы по разведке подземных вод и осушению горных выработок позволяют подразделить формы тре-

щиноватости карстовых пустот, распространенные в карбонатных породах, на две группы: 1) региональные, или рассеянные карст и трещиноватость; 2) локальные, или сосредоточенные карст и трещиноватость.

К первой группе можно отнести сравнительно небольшие каверны, пустоты, тонкие каналы, мелкие трещины, местные раздувы и другие открытые карстовые полости. Региональный карст развивается непосредственно по системам мелкой трещиноватости и пустотам выщелачивания, вследствие чего эти формы карста равномерно рассеяны по всей толщине известняков.

Ко второй группе относятся крупные открытые карстовые полости, каналы, галереи, колодцы и пещеры, которые обычно сосредоточены на узких участках, в определенных зонах и отдельных свитах, не характерных для всей толщи карбонатных пород. Такие формы карста часто концентрируются, например, в виде линейно-вытянутой структуры, по зонам дробления мощных тектонических нарушений и брекчирования вдоль контактов с подстилающими породами. Нередко они приурочены к площади распространения отдельных свит карбонатных пород; обладающих высокой химической активностью, или в сводной части складчатых форм.

Региональные и локальные трещиноватость и закарстованность известняков создают следующие характерные особенности в распределении в них подземных вод.

1. Открытые карстовые пустоты локального типа, как правило, играют роль главных коллекторов, в которых сосредотачиваются мощные потоки трещинно-карстовых вод. К зонам распространения локального карста по тектоническим нарушениям и контактам часто приурочены крупные родники с расходом до 1,5 $м^3/с$ (реже до 5 $м^3/с$), которые могут служить критерием для поисков наиболее перспективных участков и проведения на их площади предварительной и детальной разведки, а в дальнейшем — для создания концентрированных водозаборных сооружений. Исследованиями установлено, что локальные трещиноватость и закарстованность в сложно дислоцированных известняках поражают карбонатные породы на всю их мощность и распространяются на большие глубины (на 800—1500 м ниже современного местного базиса эрозии). В некоторых горно-складчатых районах Урала, Казахстана и Средней Азии на таких глубинах открытые пустоты являются водоносными и содержат пресную воду гидрокарбонатно-кальциевого состава. В связи с этим закарстованные известняки в гидрогеологическом отношении можно рассматривать как огромные естественные подземные водохранилища.

2. Трещиноватость и закарстованность регионального типа, широко поражающие карбонатные породы по мощности и в плане, в гидрогеологическом отношении играют роль среды, связывающей массив известняков в целом с отдельными зонами распространения открытых пустот локального типа, к которым

приурочены мощные потоки подземных вод. Вследствие этого в карбонатных породах формируется единый гидравлически связанный бассейн трещинно-карстовых вод. Степень гидравлической связи, так же как и гидрогеологический режим карстового бассейна в целом, характеризуется сложностью и фильтрационной неоднородностью.

3. Закарстованный массив карбонатных пород на площади бассейна трещинно-карстовых вод характеризуется большой фильтрационной неоднородностью в плане и в разрезе. Наибольшая водопроницаемость известняков отмечается вдоль зон распространения карста локального типа. В отдельных блоках известняков иногда встречаются слабообводненные или практически необводненные участки. Участки детальной разведки обычно невелики, поэтому с фильтрационной неоднородностью известняков приходится считаться и учитывать эти особенности при разведке месторождений трещинно-карстовых вод и оценке их эксплуатационных запасов.

В горно-складчатых областях в условиях водоносности карбонатных пород формируется вертикальная гидрогеологическая зональность (рис. 11), для которой характерно наличие трех зон: I — зона инфлюации и транзита подземных вод, залегающая выше местного базиса эрозии современной гидрографической сети; II — зона активного подземного стока, в пределах которой формируются основные ресурсы трещинно-карстовых вод. Здесь можно выделить подзону активного местного стока (сток под влиянием местного базиса эрозии) и подзону регионального подземного стока (сток под влиянием регионального базиса эрозии); III — зона затрудненного подземного стока,

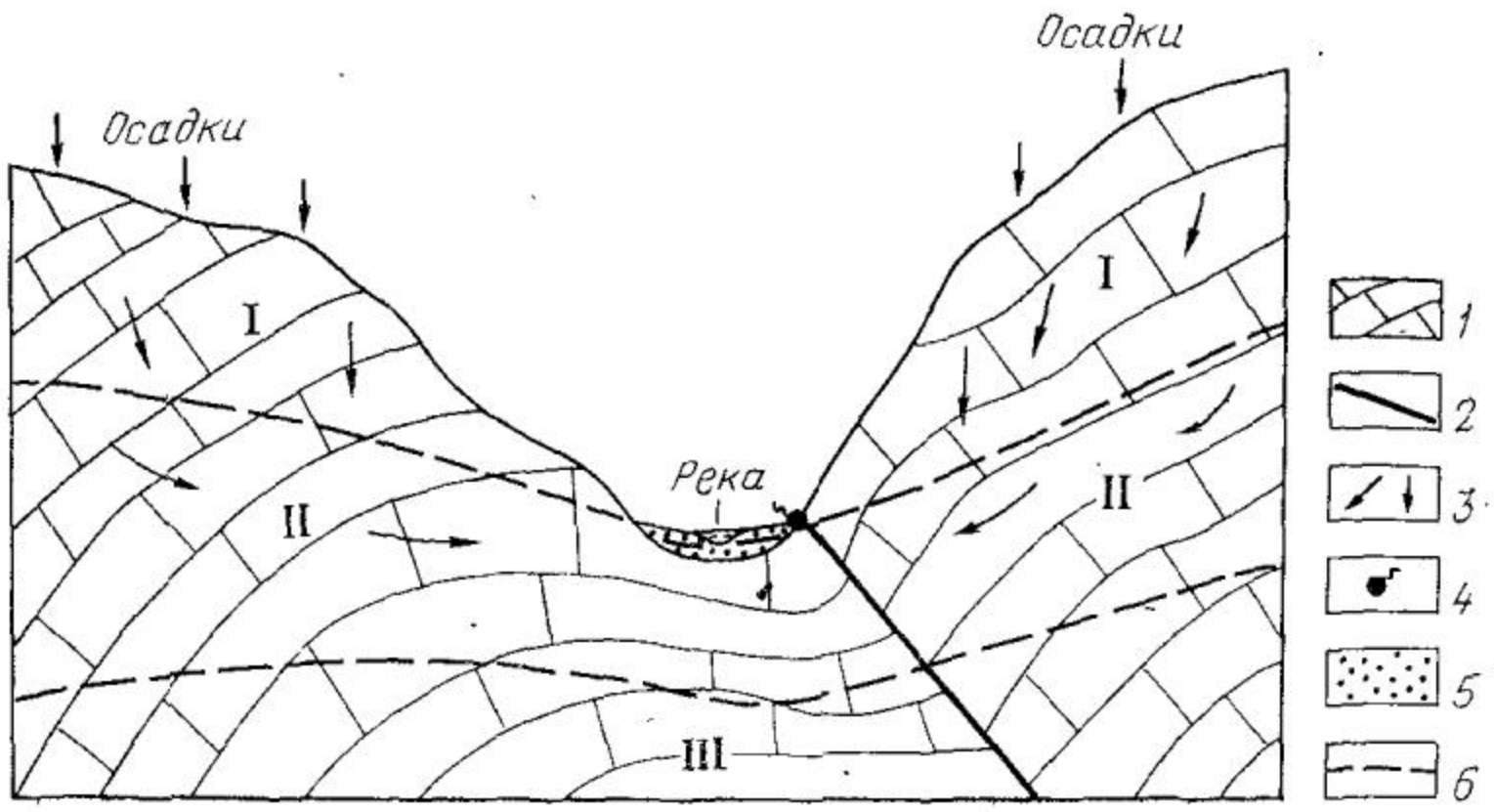


Рис. 11. Схема вертикальной гидрогеологической зональности в карбонатных породах.

I — зона инфлюации и транзита трещинно-карстовых вод; II — зона активного подземного стока и накопления основных естественных ресурсов и запасов трещинно-карстовых вод; III — зона замедленного подземного стока и накопления трещинно-карстовых вод повышенной минерализации. *1* — известняки; *2* — тектоническое нарушение; *3* — направление стока подземных вод; *4* — родник; *5* — галечники; *6* — границы зон

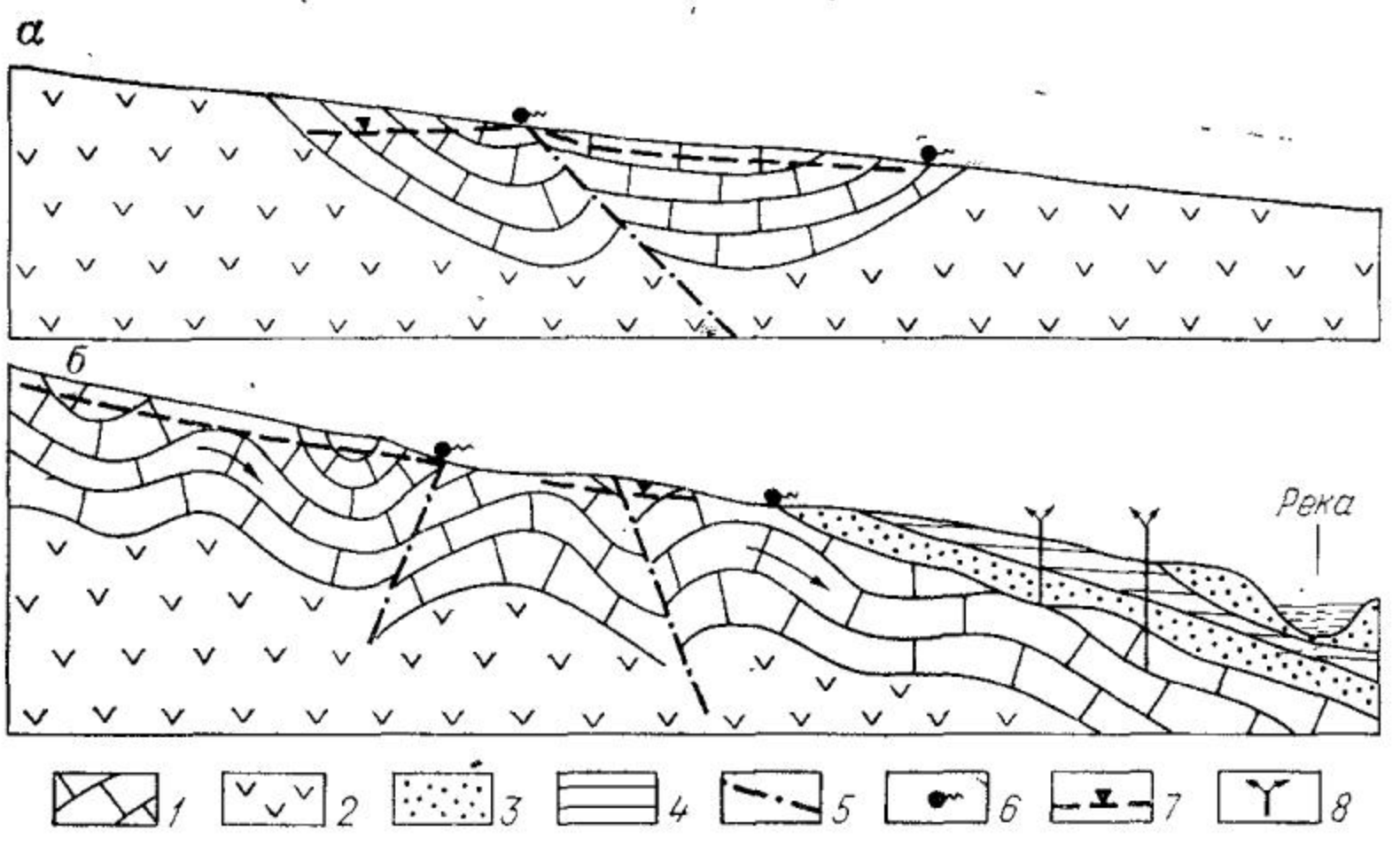


Рис. 12. Месторождения трещинно-карстовых вод:

а — замкнутый бассейн; *б* — открытый бассейн. *1* — водоносные карбонатные породы; *2* — слабопроницаемые трещиноватые породы (эффузивы, сланцы); *3* — рыхлые песчано-глинистые отложения (преимущественно водоносные пески); *4* — глины; *5* — зона тектонических нарушений; *6* — родники; *7* — уровень трещинно-карстовых вод; *8* — фонтанирующие скважины

залегающая ниже местного базиса эрозии, где трещинно-карстовые воды имеют незначительные скорости движения и в некоторых случаях несколько повышенную минерализацию.

Месторождения трещинно-карстовых вод замкнутых бассейнов. Как видно из табл. 4, месторождения второго типа встречаются в двух разновидностях бассейнов трещинно-карстовых вод: в замкнутых и открытых.

Первый подтип объединяет ограниченные по площади бассейны трещинно-карстовых вод, имеющие такие геолого-структурные условия, при которых образуются относительно замкнутые или почти замкнутые гидрогеологические районы, обычно вытянутые по простиранию узких полос известняков, залегающих в форме синклиналеподобных складок. Подземный сток из таких бассейнов характеризуется преимущественно родниковым расходом и определяется граничными условиями слабоводопроницаемых вмещающих некарстующихся пород (рис. 12).

Вверх по течению поверхностного потока в зоне контакта карбонатной толщи с вмещающими породами уровень трещинно-карстовых вод обычно залегает на глубинах ниже современного русла реки (до 10 м), поэтому в этой части бассейна располагается основная область питания и наблюдается естественное, иногда довольно интенсивное, поглощение поверхностных вод.

В зоне нижнего контакта происходит естественная разгрузка трещинно-карстовых вод в виде родников. При наличии на площади распространения бассейнов этого подтипа большой

мощности известняков и постоянно действующего поверхностного речного стока промышленная их ценность резко возрастает, так как появляется возможность создать наиболее производительные водозаборы инфильтрационного типа.

Месторождения трещинно-карстовых вод этого подтипа наиболее широко распространены и изучены на Урале, где они интенсивно используются для водоснабжения ряда городов и горнорудных предприятий. В области развития мощной толщи зеленокаменных пород палеозойские известняки часто залегают в форме замкнутых, линейно-вытянутых в плане, синклиналеподобных структур. Месторождения трещинно-карстовых вод, приуроченные к замкнутым бассейнам, распространены также на Алтае, в Центральном Казахстане и в Средней Азии.

Опыт разведки и эксплуатации месторождений трещинно-карстовых вод описываемого типа показывает, что при отсутствии на площади замкнутых бассейнов речной сети с постоянно действующими или паводковыми расходами промышленная ценность таких месторождений резко снижается. Атмосферные осадки не играют существенной роли в формировании эксплуатационных запасов, так как водосборная площадь бассейна обычно мала. Эксплуатационные запасы на водозаборных участках в этом случае формируются за счет естественных ресурсов и запасов.

Своеобразные замкнутые бассейны трещинно-карстовых вод встречаются в Центральном Казахстане, где они имеют относительно большие площади распространения (до 800 км²) и более сложные гидрохимические условия формирования естественных ресурсов и запасов, характерные для аридных зон СССР. Поверхность распространения карбонатных пород на площади бассейна слабо расчленена, а мелкая гидрографическая сеть, как правило, не имеет постоянно действующих поверхностных потоков; весьма редко развита и родниковая сеть.

Характерным в гидрогеологическом отношении является то, что замкнутые бассейны трещинно-карстовых вод в Центральном Казахстане формируются в пределах относительно полого залегающих брахиантиклинальных складок. Трещинно-карстовые воды пород палеозоя, если отсутствует речная сеть, имеют единственный источник питания — атмосферные осадки, выпадающие в течение года неравномерно и в незначительном количестве (160—220 мм/год). Области питания замкнутых бассейнов трещинно-карстовых вод, таким образом, обычно полностью совпадают с площадью их распространения. Гидрохимические условия на площади таких бассейнов являются сложными. В центральной части брахискладок обычно распространены пресные воды гидрокарбонатно-хлоридно-кальциево-натриевого состава с общей минерализацией до 1 г/л. В краевых частях свода, где наблюдается постепенное погружение водоносных карбонатных пород под более молодую толщу песчаников, а также на глубинах более 120 м в центральной

части бассейна отмечается постепенное повышение общей минерализации трещинно-карстовых вод до 3 (реже 8) г/л. Пресные воды, таким образом, залегают на месторождении в форме огромной линзы (рис. 13).

Месторождения трещинно-карстовых вод замкнутых бассейнов брахиантиклинальных структур имеют большое значение в разрешении проблем водоснабжения горнорудных объектов Центрального Казахстана.

Месторождения трещинно-карстовых вод открытых бассейнов обычно распространены в открытых бассейнах трещинно-карстовых вод, в которых геолого-структурные условия и значительная площадь распространения карбонатных пород отличаются наличием четко выраженной области питания, что обеспечивает формирование относительно свободного местного (родниковый) и регионального глубинного подземного стока в сторону погружения водовмещающей структуры под более молодые образования. К таким бассейнам, имеющим большую площадь распространения, как правило, приурочены мощные подземные потоки (см. рис. 12, *б*).

На площади бассейнов, таким образом, формируются значительные естественные ресурсы и запасы трещинно-карстовых вод, накопление которых происходит преимущественно на глубинах ниже местного базиса эрозии.

За счет глубинного регионального стока трещинно-карстовых вод в сторону погружения известняков в покрывающих толщах более молодых пород очень часто образуются напорные водоносные горизонты сопряженного артезианского бассейна.

Наиболее характерные в гидрогеологическом отношении месторождения этого подтипа встречаются в Южном Казахстане, по западному склону Урала, в Средней Азии, в Восточной Сибири и других горно-складчатых областях Советского Союза, где карбонатные породы имеют значительные мощности и большую площадь распространения. В перечисленных

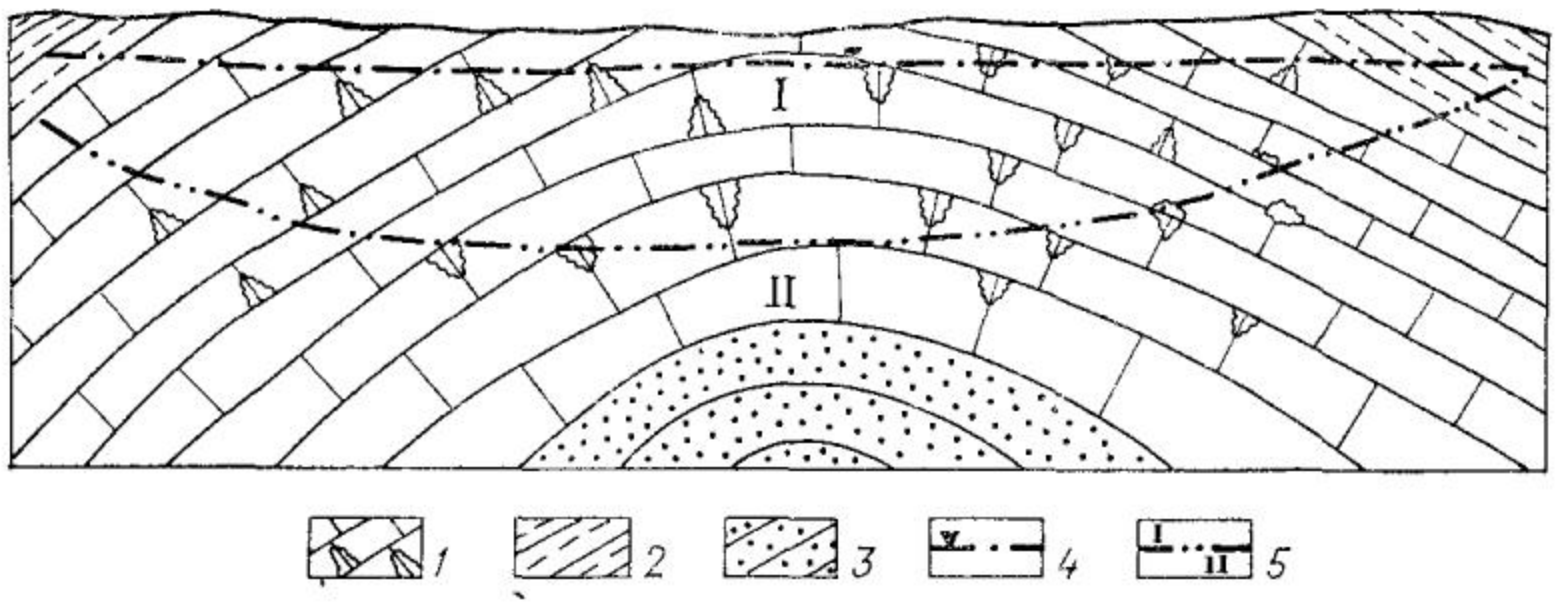


Рис. 13. Схематический разрез замкнутого бассейна трещинно-карстовых вод казахстанского типа.

1 — закарстованные водоносные известняки; *2* — глинистые породы; *3* — песчаники; *4* — уровень трещинно-карстовых вод; *5* — граница раздела пресных (I) и минерализованных (II) подземных вод

областях промышленное значение этих месторождений очень велико. На некоторых из них действуют водозаборные сооружения, суммарный дебит которых достигает 200 тыс. м³/сут, а суммарные водопритоки в систему подземных горных выработок на рудниках достигают 320 тыс. м³/сут. Бассейны трещинно-карстовых вод в указанных районах имеют обычно большие площади (от 3000 до 8000 км²), поэтому существенную роль в питании таких вод играет инфильтрация атмосферных осадков, выпадающих непосредственно на площади распространения известняков и прилегающих контактирующих пород. Инфильтрация атмосферных осадков в данном случае может обеспечить формирование в водоносной толще карбонатных пород значительных естественных ресурсов и запасов подземных вод. Такие природные особенности принципиально отличают месторождения этого подтипа от месторождений, приуроченных к замкнутым бассейнам трещинно-карстовых вод.

Однако и для месторождений этого подтипа большую роль в увеличении эксплуатационных возможностей отдельных водозаборных участков играют процессы инфильтрации поверхностных вод из речной сети. На некоторых участках поверхностные воды рек имеют прямую связь с подземными водами через открытые карстовые пустоты, обнажающиеся в современном русле реки. Эти участки обычно отчетливо фиксируются в виде мощных родников. Такие участки разгрузки наиболее благоприятны для создания водозаборных сооружений инфильтрационного типа. Очень часто в долинах рек родниковый сток приурочен к мощным зонам тектонических нарушений. На некоторых отрезках речных долин гидравлическая связь трещинно-карстовых и поверхностных вод может осуществляться через рыхлые аллювиальные песчано-галечниковые отложения, выполняющие современное русло реки. В этих условиях дебиты водозаборных скважин будут формироваться за счет естественных ресурсов и запасов. Большое промышленное значение месторождений трещинно-карстовых вод для развития народного хозяйства требует пристального и тщательного их изучения. Наличие в изучаемом районе большой площади распространения карбонатных толщ может являться поисковым критерием на обнаружение бассейнов трещинно-карстовых вод.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ПЛОЩАДИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИНЗ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Месторождения, приуроченные к площадям распространения линз пресных грунтовых вод, делятся на два подтипа: а) месторождения в линзах песчаных массивов пустынь; б) месторождения в приканальных линзах (см. табл. 4).

Месторождения первого подтипа распространены в аридной и гумидной зонах СССР — в песчаных пустынных районах и на

морских побережьях. Однако наиболее крупные месторождения были обнаружены в песчаных пустынях Средней Азии и Южного Казахстана.

Гидрогеологические условия формирования линз пресных вод в песчаных пустынях изучены слабо, поэтому ряд вопросов связанных, например, с генезисом линз, предстоит разрешить в ходе широкомасштабных поисково-разведочных работ и в результате обобщения опыта эксплуатации месторождений.

Питание пресных грунтовых вод в линзах может происходить за счет следующих источников: а) инфильтрации атмосферных осадков; б) конденсации влаги из воздуха; в) инфильтрации поверхностных вод временно действующих потоков. Некоторые исследователи предполагают, что наиболее крупные по объему и площади линзы пресных подземных вод имеют реликтовое происхождение.

Наряду с мелкими линзами, имеющими площадь 1—2 км² и мощность водоносного горизонта 3—5 м, в нашей стране известны крупные линзы, распространенные на сотни и даже тысячи квадратных километров и имеющие мощности продуктивного горизонта до нескольких десятков метров. К таким крупным линзам пресных вод приурочены месторождения промышленного типа.

В более мелких по площади линзах аридной зоны формируются ограниченные естественные ресурсы и запасы пресных подземных вод (так называемые подтакырные, прибарханные и др.). Однако такие месторождения имеют относительно более широкое распространение, и их ресурсы нередко являются единственным источником питьевой воды в пустыне.

В аридной зоне СССР месторождения линз пресных подземных вод отличаются очень сложными гидрогеохимическими условиями. Линзы эти формируются в песчаных массивах, вследствие физико-химического разделения пресных и соленых вод в толще песчаного массива (без наличия между ними слабопроницаемых пород), именно поэтому в литературе их нередко называют *плавающими линзами.*

Таким образом, пресные грунтовые воды на площади линзы в плане и разрезе непосредственно контактируют с подземными водами повышенной (до 6 г/л) и высокой (до 15 г/л) минерализации.

Эти гидрогеохимические особенности месторождения предопределяют выбор не только методики их разведки, но и технологии эксплуатации.

Наиболее крупные месторождения линз пресных грунтовых вод выявлены в пустыне Каракумы, где они приурочены к песчаным образованиям и, по В. Н. Кунину, называются подпесчаными линзами пресных вод. Наиболее крупной из них и относительно хорошо разведанной является Ясханская линза, где создано первое в Советском Союзе водозаборное сооружение по схеме спаренных скважин (рис. 14).

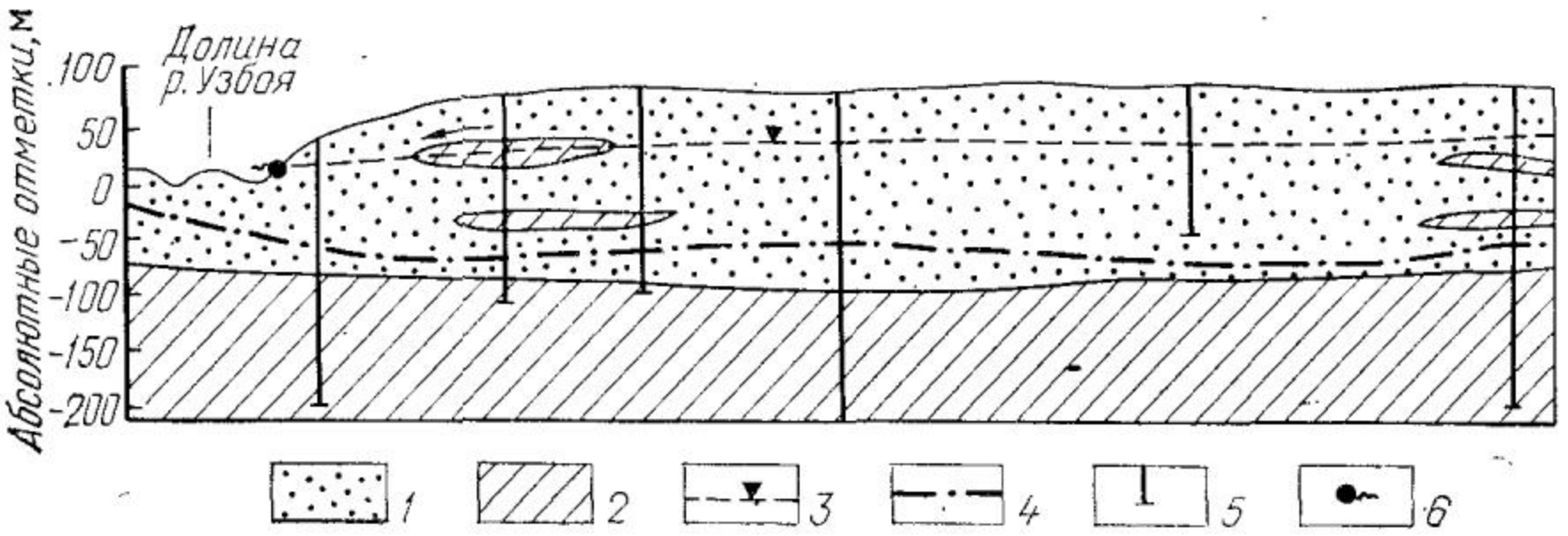


Рис. 14. Схематический разрез месторождения Ясханской линзы пресных вод.

1 — водоносные пески; *2* — глины; *3* — уровень пресных грунтовых вод; *4* — примерная граница раздела пресных и минерализованных вод; *5* — скважина; *6* — родник

Рассмотрим гидрогеохимические особенности месторождений этого типа на примере Ясханской линзы (по данным Н. Г. Шевченко). Она расположена в центральной части так называемых Приузбойских Каракумов. Грунтовые воды приурочены здесь к древним аллювиальным отложениям четвертичного возраста. В плане линза имеет форму эллипса, большая ось которого вытянута в широтном направлении на расстояние до 70 км, максимальная ширина линзы 30 км. Площадь линзы с минерализацией пресных подземных вод до 1 г/л составляет около 2000 км^2; средняя минерализация грунтовых вод внутри этого контура 0,3—0,5 г/л. Мощность продуктивного горизонта пресных грунтовых вод достигает 78 м, в периферии линзы она уменьшается. Глубина залегания уровня грунтовых вод на площади линзы изменяется от 10 до 40 м. Исследованиями было установлено, что на большей части площади линзы пресные грунтовые воды залегают («плавают») непосредственно на соленых водах без разделяющих слоев. Однако при этом четко отмечается присутствие переходной зоны от пресных вод к минерализованным. На отдельных участках их разделяет небольшой мощности слой глин апшеронского яруса. Таким образом, Ясханская линза как бы окружена со всех сторон подземными водами повышенной (до 3 г/л) и высокой (до 60 г/л) минерализации. В гидродинамическом отношении Ясханская линза может быть отнесена к группе плавающих линз.

В пределах переходных зон в плане и разрезе отмечается постепенное увеличение общей минерализации подземных вод. В вертикальном разрезе мощность переходной зоны относительно невелика и изменяется от 5 до 10 м, а в плане она занимает несколько километров. Так, у южных и восточных границ линзы ширина переходной зоны в плане составляет 3 км, а в отдельных местах она достигает 10 км (минерализация подземных вод изменяется от 1 до 30 г/л). На северной границе ширина переходной зоны составляет 8 км. Было установлено, что вдоль левого берега Западного Узбоя (палео-Аму-

дарьи) четко фиксируется наличие естественной разгрузки грунтовых вод с площади Ясханской линзы в форме нисходящих родников. С этим процессом связано питание пресных озер Западного Узбоя.

Разведочными работами, проведенными на Ясханской линзе. были выявлены сравнительно крупные естественные запасы пресных подземных вод и незначительные ежегодно восполняемые их естественные ресурсы. В настоящее время на месторождении действует оригинальное водозаборное сооружение, созданное для хозяйственно-питьевого водоснабжения Небит-дага.

Месторождения линз пресных подземных вод второго подтипа (см. табл. 4) распространены в виде линейно-вытянутых фильтрационных потоков, формирующихся вдоль ирригационных или транспортных каналов. Этот подтип месторождений можно назвать приканальными линзами пресных подземных вод.

Естественные ресурсы и запасы на таких месторождениях формируются за счет фильтрационных потерь из канала. Масштабы приканальных линз пресных подземных вод определяются, прежде всего, природной емкостью водовмещающих пород — мощностью зон аэрации и полного насыщения,— а также режимом источника их питания — поверхностных вод канала. Месторождения эти, создаваемые в результате инженерной деятельности человека, довольно широко распространены на территории СССР, что связано с интенсивной водохозяйственной деятельностью в равнинных частях страны. В аридной зоне месторождения приканальных линз пресных вод формируются, например, вдоль многочисленных магистральных ирригационных каналов (Каракумский, Ферганские, Северо-Крымский и др.). В гумидной зоне такие месторождения формируются вдоль магистральных транспортных каналов (Волга — Москва и др.).

При изучении описываемых месторождений очень важно установить положение границ линзы в плане и разрезе. В этом отношении можно выделить две наиболее типичные схемы (рис. 15) граничных условий, складывающихся при формировании линзы в условиях: а) подпертой фильтрации из канала; б) свободной фильтрации поверхностных вод из канала, когда уровень грунтовых вод отрывается от русла канала.

Эти условия гидравлической взаимосвязи пресных подземных вод линзы и поверхностных вод канала имеют существенное значение при обосновании расчетной схемы, принимаемой для оценки эксплуатационных запасов, поэтому они должны быть изучены в процессе проведения разведочных работ. В аридной зоне СССР, где в рыхлых, четвертичных образованиях часто распространены соленые воды, нижняя граница линзы пресных подземных вод под каналом имеет сложные гидрогеохимические условия: пресные воды залегают непосредственно на соленых водах, образуя «плавающие» линзы пресных вод. В тех случаях, когда канал работает не круглогодично, в нем со временем

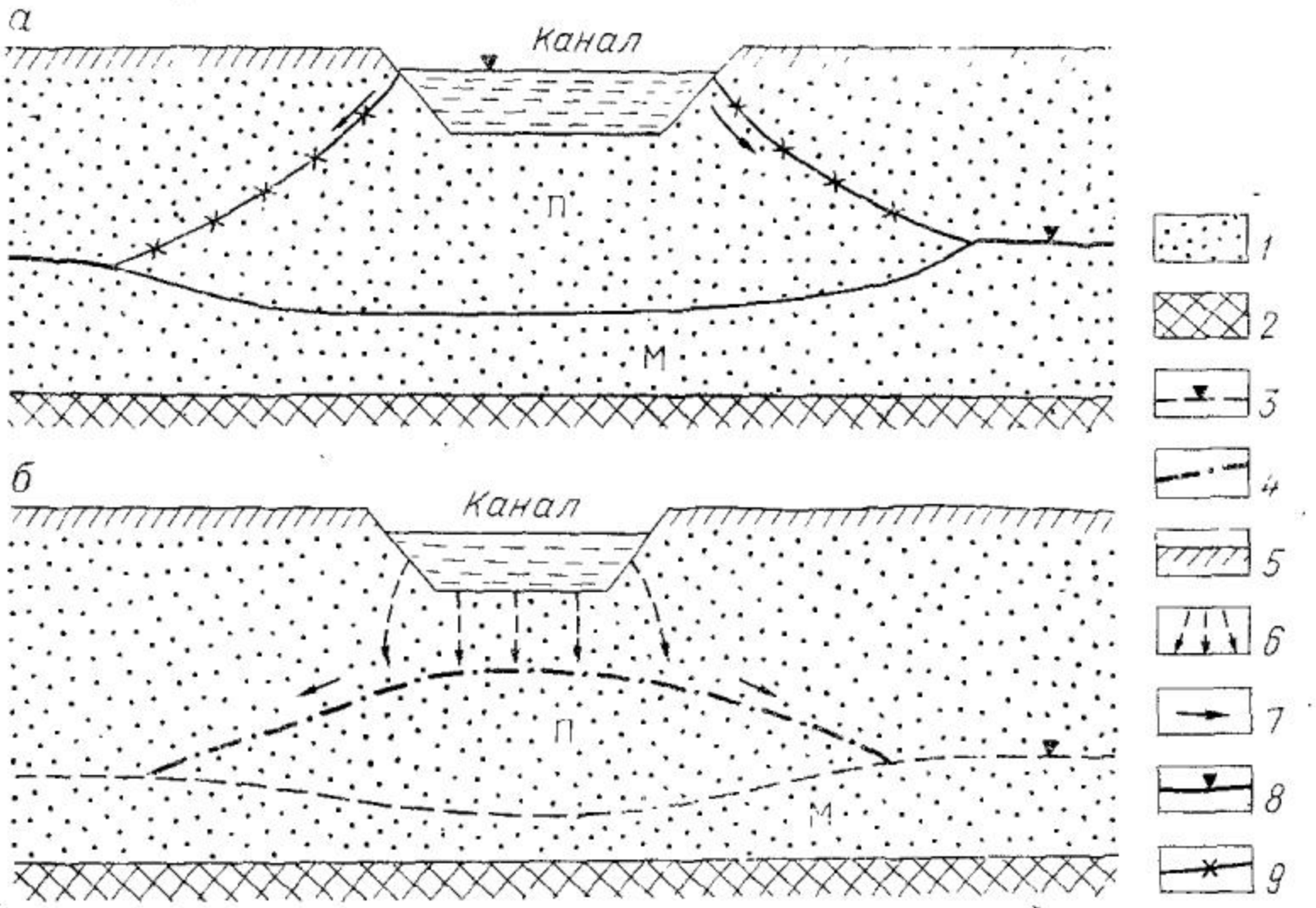


Рис. 15. Схемы формирования приканальных линз пресных подземных вод в условиях подпертой *(а)* и свободной *(б)* фильтрации из канала.

1 — водоносные породы; *2* — водонепроницаемые породы; *3* — естественный уровень подземных вод; *4* — уровень подземных вод с учетом питания из канала; *5* — покровные образования; *6* — свободная фильтрация; *7* — направление стока; *8* — уровень минерализованных вод; *9* — контур линзы пресных подземных вод. П — пресные воды; М — минерализованные воды

изменяются условия формирования границ линзы в плане и разрезе. Таким образом, линзы пресных подземных вод могут образовываться в условиях присутствия постоянно (поверхностные воды канала) и периодически действующего источника питания. При близком залегании грунтовых вод линзы (менее 4 м) инфильтрационные потери из канала (основной источник питания) расходуются на пополнение естественных ресурсов и запасов, а также на испарение. При глубине залегания грунтовых вод более 4 м инфильтрационные потери расходуются преимущественно на пополнение запасов грунтовых вод. Такие условия питания и формирования граничных условий фильтрационного потока подканальных линз пресных подземных вод обусловливают некоторые особенности их разведки и оценки эксплуатационных запасов.

В настоящее время накоплен небольшой опыт разведки и эксплуатации месторождений пресных подземных вод приканальных линз в нашей стране. В Узбекистане и Туркмении существует несколько водозаборных сооружений, расположенных вдоль ирригационных каналов, производительностью до 15 тыс. м^2/сут. Месторождения пресных подземных вод этого подтипа могут быть использованы для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения крупных сельскохозяйственных объектов, обычно базирующихся вдоль крупных ирригационных каналов.

В качестве примера приведем краткое описание подканальной линзы пресных грунтовых вод, расположенной вдоль магистрального канала Пахта — Арал в пределах распространения аллювиальных отложений в низовье р. Амударьи. Линза пресных грунтовых вод сформировалась в аллювиальных песках в результате инфильтрации поверхностных вод канала. Уровень грунтовых вод залегает на глубинах 1,5—3,0 м, фильтрационные потери из канала достигают 0,17 м³/с на 1 км его длины. Питание расходуется на испарение и на восполнение запасов пресных грунтовых вод. В плане линза представляет собой сравнительно узкую полосу, ориентированную вдоль канала. Ширина линзы по левому берегу канала достигает 300 м, а по правому — 700 м; длина линзы более 3 км. Мощность сформировавшегося продуктивного горизонта пресных грунтовых вод изменяется от 30 до 40 м; ниже распространены соленые подземные воды с минерализацией до 10 г/л, залегающие на первом от поверхности водонепроницаемом слое глин. Мощность горизонта соленых вод под линзой составляет 45 м. Водоносные пески линзы обладают хорошими фильтрационными свойствами — коэффициент фильтрации достигает 20 м/сут. На базе ресурсов пресных грунтовых вод линзы построено водозаборное сооружение (ряд водозаборных скважин), общей производительностью до 10 тыс. м³/сут.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПЛОЩАДИ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ ПЛАТФОРМЕННОГО ТИПА

Под платформой принято понимать основной элемент структуры континентов, противопоставляемый геосинклиналям и отличающийся от них значительно более спокойным тектоническим режимом. В вертикальном разрезе платформ различают два структурных этажа: а) нижний — фундамент платформы, в пределах которого метаморфические породы сложно дислоцированы и прорываются интрузиями, и б) верхний — называемый платформенным чехлом, где осадочные породы имеют очень пологое залегание и нередко осложнены тектоническими нарушениями. От нижнего структурного этажа платформенный чехол обычно отделяется поверхностью резкого регионального несогласия. Для платформенных областей нашей страны характерно наличие месторождений напорных вод, приуроченных к площади развития крупных артезианских бассейнов. Гидрогеологические условия основных артезианских бассейнов платформенного типа достаточно хорошо освещены в литературе, и прежде всего в многотомной монографии «Гидрогеология СССР», поэтому отметим только основные природные черты этих бассейнов.

Артезианские бассейны платформенного типа обычно имеют значительную площадь распространения (300—400 тыс. км² и более) и в гидрогеологическом отношении представляют собой

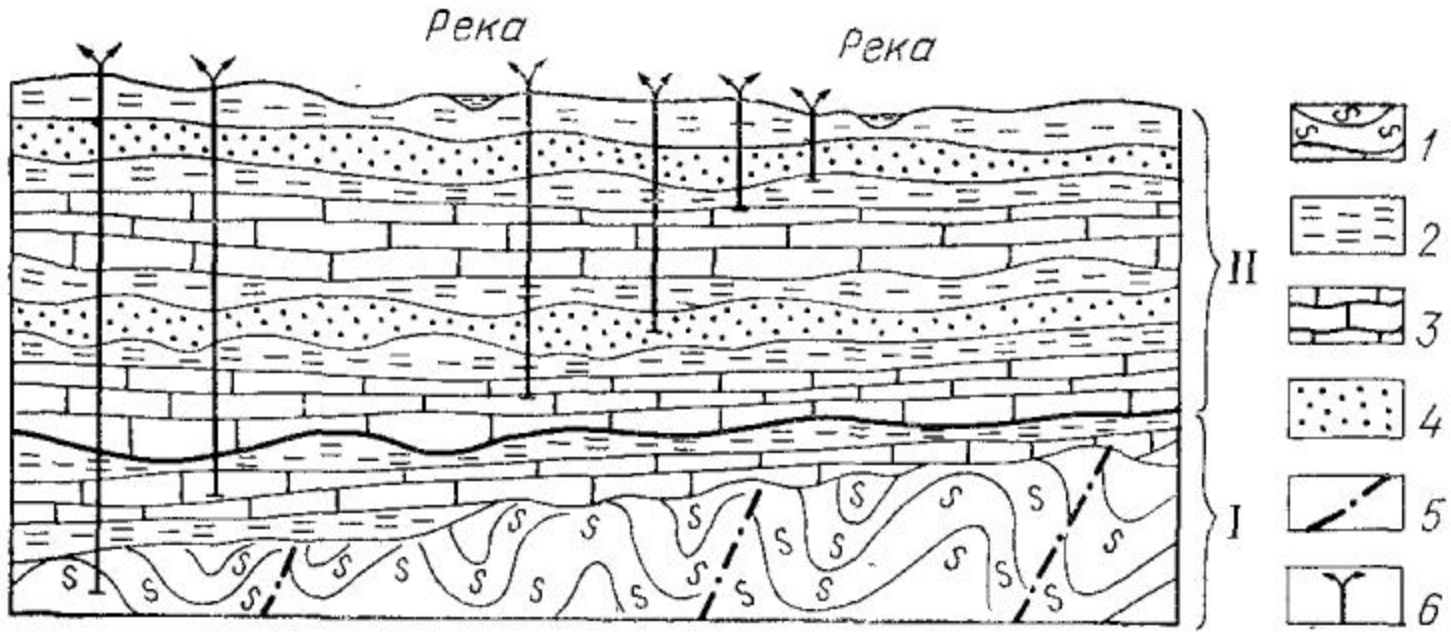


Рис. 16. Схематический разрез артезианского бассейна платформенного типа (фрагмент).

1 — метаморфические, сложно дислоцированные породы; *2* — водонепроницаемые породы; *3, 4* — водопроницаемые породы (*3* — известняки, *4* — пески); *5* — тектонические нарушения; *6* — фонтанирующие скважины. I — фундамент платформы (нижний структурный этаж); II — платформенный чехол (верхний структурный этаж)

сложную систему этажно расположенных напорных водоносных горизонтов (рис. 16). Основные водоносные горизонты со значительными естественными запасами пресных напорных вод обычно отмечаются в верхнем структурном этаже. В вертикальном разрезе в верхнем структурном этаже распространена система водоносных горизонтов, разделенных выдержанными прослоями слабопроницаемых пород, через которые осуществляется гидравлическая связь между отдельными горизонтами. К породам складчатого фундамента чаще всего приурочены напорные воды трещинного типа с несколько повышенной минерализацией. При близком залегании фундамента от поверхности земли (например, в пределах Воронежского структурного вала — юго-западное крыло Московского артезианского бассейна) трещинные воды метаморфических пород пресные.

На площади крупных платформенных структур обычно распространены системы артезианских бассейнов. Например, на огромной площади Русской платформы выделяются Прибалтийский, Ленинградский, Московский, Сурско-Хоперский, Волго-Камский, Печорский и другие бассейны. В пределах Западно-Сибирской платформы выделяются Тобольский, Иртышский бассейны и т. д.

Практика разведки показывает, что несмотря на значительную площадь распространения водоносных пластов, не так просто обнаружить на площади артезианского бассейна платформенного типа собственно промышленное месторождение напорных вод с крупными эксплуатационными запасами, особенно в том случае, когда водоносные породы обладают большой фильтрационной неоднородностью (например, в условиях водоносности карбонатных пород палеозоя в пределах центральной части Московского артезианского бассейна). Нередко на площади артезианского бассейна приходится выполнять комплекс спе-

циальных поисковых работ (геофизические исследования и бурение поисковых скважин) перед предварительной разведкой с целью обнаружения наиболее перспективных участков.

Артезианские бассейны платформенного типа характеризуются относительно большой глубиной залегания водоносных горизонтов, изменяющейся от 100 до 800 м, а также значительной мощностью водовмещающих пород. Например, в центральной части Московского артезианского бассейна водоносные горизонты в каменноугольных отложениях имеют общую мощность до 250 м; в Сурско-Хоперском бассейне более 300 м. Такая глубина залегания напорных пластов требует более рационального размещения объемов бурения при постановке поисково-разведочных работ.

В вертикальном разрезе на площади артезианских бассейнов платформенного типа по гидродинамическим признакам можно выделить (сверху вниз) три зоны: а) активного подземного стока, формирующуюся под дренирующим влиянием местной и региональной гидрографической сети; б) замедленного подземного стока; в) весьма замедленного подземного стока, где преобладает сток не по пласту, а по тектоническим нарушениям глубокого заложения (в вертикальном направлении).

Ресурсы пресных подземных вод в артезианских бассейнах формируются преимущественно в зоне активного подземного стока, мощность которой изменяется от 200 до 600 м. В пределах этой зоны обычно проводится комплекс поисково-разведочных работ с целью изучения ресурсов пресных подземных вод и выявления месторождений промышленного типа.

Для системы артезианских бассейнов платформенного типа характерно формирование вертикальной гидрогеохимической зональности: постепенного повышения с глубиной степени общей минерализации подземных вод и изменения их химического состава. Как известно, зональность обычно приурочена к верхней части (примерно к зоне активного подземного стока) подземных вод гидрокарбонатного состава с общей минерализацией до 1 г/л, сменяющихся вглубь водами сульфатного, а затем хлоридного состава с повышенной общей минерализацией (до 20, реже до 30 г/л). К наиболее глубоким частям артезианских бассейнов платформенного типа приурочены воды высокой минерализации — нередко весьма крепкие рассолы хлориднонатриевого состава.

Исследованиями последних лет было установлено, что на площади артезианских бассейнов платформенного типа в естественных условиях и при эксплуатации интенсивно проявляются процессы перетекания напорных вод между водоносными горизонтами (процессы взаимодействия в системе напорных водоносных пластов), а также между подземными и поверхностными водами, особенно в долинах крупных рек (Волга, Ока, Днепр, Обь и др.). Эти процессы необходимо учитывать и изучать при разведке и эксплуатации месторождений, так как с ними свя-

зано формирование на водозаборном участке привлекаемых ресурсов.

Совокупность гидрогеологических закономерностей, изложенных выше, характеризует главную особенность артезианских бассейнов платформенного типа — формирование на площади бассейна значительных упругих запасов напорных подземных вод. Отдельные месторождения напорных вод или водозаборные участки обычно имеют большие эксплуатационные возможности: известны водозаборные сооружения производительностью до 120 тыс. м³/сут, а дебит группы водозаборов может достигать 250 тыс. м³/сут. В этом отношении промышленные месторождения напорных вод артезианских бассейнов имеют исключительно большое практическое значение.

Л. С. Язвин [11] справедливо подчеркивает, что одна из гидрогеологических особенностей артезианских бассейнов платформенного типа, предопределяющих особенности оценки эксплуатационных запасов, состоит в том, что по мере погружения водоносных горизонтов наблюдается непрерывное уменьшение, а в центральных частях бассейнов практически отсутствие влияния метеорологических и гидрологических факторов на режим напорных вод. Поэтому при расчетах дебита водозаборных сооружений величиной естественного колебания уровня артезианских вод можно пренебречь.

Основными источниками, за счет которых происходит формирование эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках, расположенных на площади артезианских бассейнов платформенного типа, могут являться [11]: а) упругие запасы продуктивного водоносного горизонта; б) естественные емкостные и другие запасы, формирующиеся при взаимодействии со смежными водоносными горизонтами; в) упругие запасы слабопроницаемых пород, разделяющих водоносные горизонты; г) емкостные запасы продуктивного горизонта в региональной области питания, где к этому пласту могут быть приурочены безнапорные подземные воды; д) привлекаемые ресурсы из поверхностных водотоков и водоемов; е) естественные ресурсы подземных вод месторождения.

Как видно из приведенного перечня источников, эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборных участках формируются в условиях интенсивного проявления процессов перетекания между водоносными горизонтами, а также взаимодействия между подземными и поверхностными водами.

Балансовую структуру эксплуатационных запасов подземных вод можно выразить следующим уравнением:

$$Q_{эз} = Q_{ер}\alpha + \frac{V_у}{T}\alpha_1 + \Delta Q_{пр}, \qquad (6.2)$$

где $Q_{ер}$ — естественные ресурсы месторождения; $V_у$ — упругие запасы продуктивного горизонта; α и α_1 — коэффициенты из-

влечения ресурсов и запасов; $\Delta Q_{пр}$ — общие привлекаемые ресурсы.

В главах 19 и 20 на конкретных примерах подробно рассмотрены особенности гидрогеологических условий месторождений подземных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа, методические приемы их разведки и оценки эксплуатационных запасов.

Итак, для артезианских бассейнов платформенного типа характерны следующие гидрогеологические особенности: 1) значительная площадь распространения водоносных горизонтов; 2) формирование в разрезе нескольких этажно расположенных водоносных пластов (система водоносных горизонтов); 3) формирование значительных и упругих запасов напорных вод; 4) наличие в вертикальном разрезе гидродинамической и гидрогеохимической зональности; 5) постепенное уменьшение влияния метеорологических и гидрологических факторов на режим напорных вод по мере увеличения глубины залегания продуктивных горизонтов.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПЛОЩАДИ АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНОВ ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЕЙ

В горно-складчатых областях нашей страны часто встречаются промышленные месторождения напорных вод второго типа, приуроченные к малым артезианским бассейнам.

Интенсивная складчатость, проявление тектонического нарушения глубокого заложения с большой амплитудой вертикального смещения, значительная расчлененность горных сооружений — все это обусловливает образование в горных районах своеобразных, как бы обособленных, артезианских бассейнов. Исключение представляют некоторые крупные межгорные котловины (типа Ферганской), на площади которых может формироваться система мелких артезианских бассейнов.

Обычно площадь артезианского бассейна горно-складчатого типа измеряется несколькими тысячами, реже несколькими десятками тысяч квадратных километров, что намного меньше, чем площадь артезианского бассейна платформенного типа. Более мелкие артезианские бассейны, площадь распространения которых может измеряться несколькими десятками или первыми сотнями квадратных километров, обычно содержат незначительные естественные ресурсы и запасы напорных вод и отличаются ограниченными эксплуатационными возможностями.

По условиям формирования эксплуатационных запасов подземных вод выделяются два подтипа таких месторождений (см. табл. 4). Месторождения первого подтипа распространены в древних речных долинах в очень мелких синклиналеподобных складках, изолированных водонепроницаемыми глинами от окружающих водоносных структур (рис. 17). Вследствие спе-

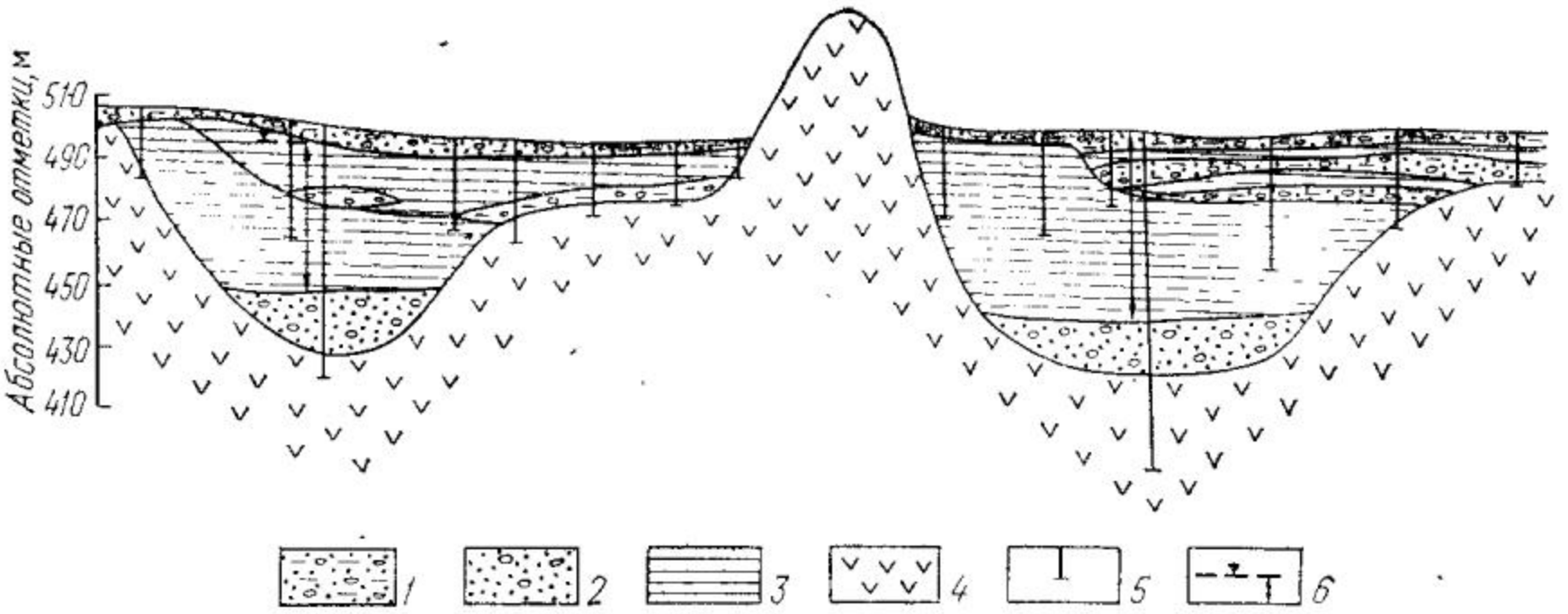


Рис. 17. Гидрогеологический разрез замкнутого артезианского бассейна (по В. А. Курдюкову).

1, 2 — водоносные горизонты (*1* — глинистые пески с галькой и щебнем, *2* — пески с галькой); *3* — водонепроницаемые глины; *4* — водоносный комплекс вулканогенных девонских отложений; *5* — скважина; *6* — пьезометрический уровень

цифических условий питания они отличаются весьма ограниченными эксплуатационными возможностями и поэтому не играют существенной роли в решении проблем водоснабжения крупных объектов.

Наиболее широко в горно-складчатых районах распространены месторождения второго подтипа, среди которых по геолого-структурным условиям можно выделить несколько разновидностей артезианских бассейнов.

1. Артезианские бассейны, приуроченные к мелким синклинальным складкам второго и третьего порядков. К ним могут быть отнесены многочисленные артезианские бассейны, распространенные непосредственно внутри горных сооружений, в Средней Азии, Казахстане и других районах СССР. Например, на площади Крымско-Кавказской складчатой области известны несколько артезианских бассейнов такого типа — Новороссийский, Геленджикский, Туапсинский, Сочинский и др. На их площади продуктивные водоносные горизонты приурочены к коренным породам мезозойского и кайнозойского возраста.

Такие месторождения распространены и в Саяно-Алтайской складчатой области. Здесь существует несколько артезианских бассейнов, приуроченных к синклинальным складкам второго и третьего порядков, например Подобасско-Тутуяский бассейн, на площади которого продуктивные водоносные горизонты встречены в юрских песчаниках и конгломератах. На базе разведанных запасов подземных вод этого бассейна организовано водоснабжение г. Новокузнецка. Здесь находится и группа Минусинских артезианских бассейнов (Южно-Минусинский, Назаровский, Рыбинский), в разрезе которых напорные водоносные горизонты приурочены к слабосцементированным песчаникам юрского и мелового возрастов.

Вмещать продуктивные горизонты могут породы самого раз-

личного литологического состава (пески, песчаники, конгломераты, известняки).

В гидрогеологическом отношении эти месторождения можно отнести к объектам со сложными условиями, когда с поверхности в покровных песчано-галечниковых образованиях могут быть распространены грунтовые воды современных аллювиальных отложений, а на глубине по разрезу синклинальной складки формируются один или два напорных водоносных горизонта (рис. 18). При таких гидрогеологических условиях создаются благоприятные предпосылки для выявления высокопроизводительного водозабора, с учетом формирования на нем привлекаемых эксплуатационных ресурсов путем дренирования грунтовых вод аллювиальных отложений и, в некоторых случаях, поверхностных вод.

В Казахстане существуют также внутрискладчатые водовмещающие структуры, в которых формируются Карагандинский и Сокурские артезианские бассейны (водовмещающими породами здесь являются песчаники юрского возраста), система Чу-Сарысуйских артезианских бассейнов (водовмещающими являются пески верхнего мела) и т. д. Балансовая структура эксплуатационных запасов подземных вод для этого типа месторождений отражается уравнением (6.1).

Вторая разновидность артезианских бассейнов горно-складчатых областей формируется в межгорных котловинах, выполненных обычно сравнительно мощными рыхлыми песчано-галечниковыми образованиями, перекрытыми с поверхности покровными суглинками или глинами (рис. 19). В таких геолого-структурных условиях в толще песчано-галечниковых образований формируется один довольно мощный напорный водоносный горизонт. Как видно из разреза, в строении артезианских бас-

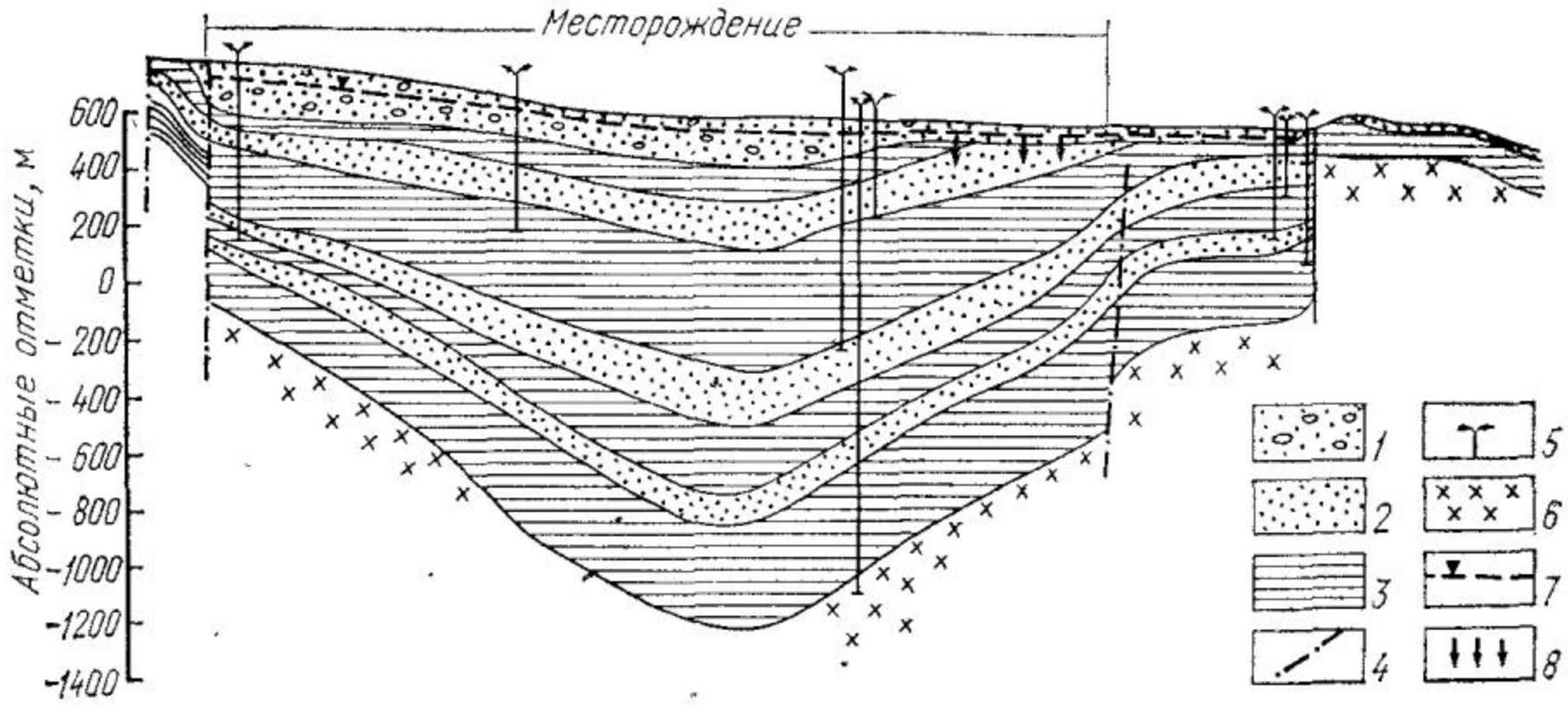


Рис. 18. Гидрогеологический разрез Зайсанского артезианского бассейна.

1 — гравийные отложения, содержащие грунтовые воды; *2* — пески, содержащие напорный водоносный горизонт; *3* — водонепроницаемые глины; *4* — тектонические нарушения; *5* — фонтанирующие поисковые скважины; *6* — водонепроницаемые породы; *7* — уровень грунтовых вод; *8* — питание

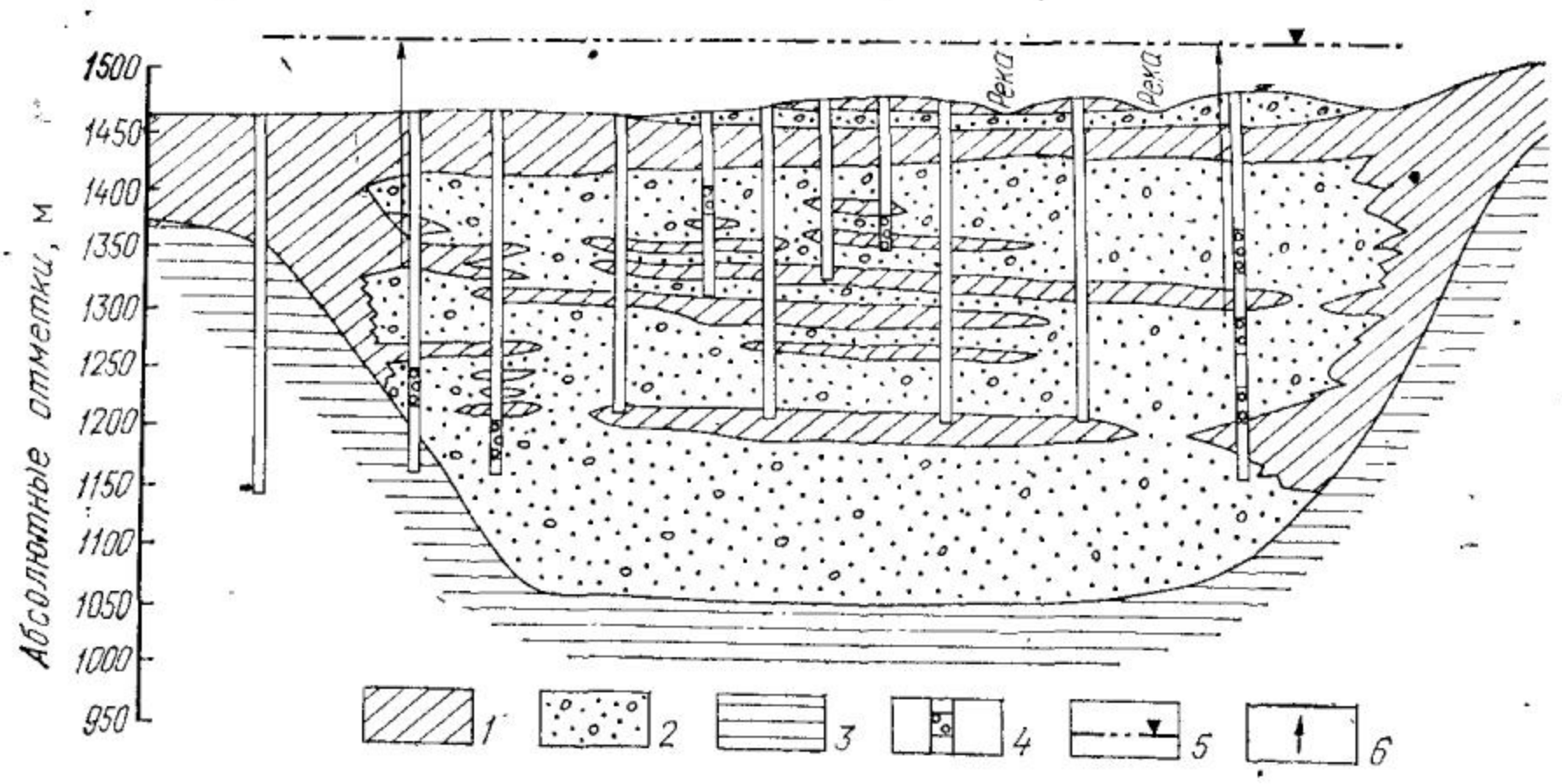


Рис. 19. Гидрогеологический разрез артезианского бассейна межгорной котловины.

1 — суглинки; *2* — валуино-галечниковые отложения; *3* — глины; *4* — скважина с фильтром; *5* — пьезометрическнй уровень напорных вод; *6* — напор

сейнов межгорных котловин принимают участие рыхлообломочные образования, представленные обычно породами, обладающими высокими коллекторскими свойствами — песками, гравием, галечниками мощностью от 50 до 500 м и более. На площади некоторых бассейнов наряду с рыхлыми породами водоносны и коренные, интенсивно трещиноватые породы (например, базальты в Араратском артезианском бассейне).

Почти со всех сторон межгорные котловины окружены горами, нередко превышающими депрессию на несколько сотен и более метров. Такая природная обстановка весьма благоприятна для питания подземных вод в результате: 1) инфильтрации поверхностных вод, стекающих с горных сооружений; 2) инфильтрации атмосферных осадков, выпадающих непосредственно на площади межгорной котловины; 3) скрытого дренирования трещинных и трещинно-жильных вод со стороны окружающих гор и основания котловины (подземный сток). Эксплуатационные запасы подземных вод на водозаборном участке могут формироваться за счет естественных ресурсов, упругих запасов продуктивного горизонта, а также привлечения ресурсов грунтовых вод и инфильтрации поверхностных вод.

Артезианские бассейны межгорных впадин распространены в республиках Средней Азии, в Армении, Грузии, Казахстане и в других районах СССР. В республиках Средней Азии наиболее крупной является группа Ферганских артезианских бассейнов, где в мощной толще песчано-галечниковых образований (более 350 м) формируются значительные естественные ресурсы и запасы подземных вод. В Киргизии наиболее крупным является Чуйский артезианский бассейн.

В Армении в пределах крупной депрессии расположен Араратский артезианский бассейн, имеющий значительную область питания в окружающей высокогорной части. В разрезе этого бассейна присутствуют два напорных водоносных горизонта: 1) в трещиноватых базальтах, слагающих основание котловины; 2) в залегающих выше озерно-аллювиальных песчано-галечниковых отложениях. На площади этого бассейна формируются довольно значительные естественные ресурсы и запасы подземных вод: только на участках естественной разгрузки подземных вод суммарный расход родникового стока составляет примерно 2 млн. м³/сут. В Грузии весьма представительным в этом отношении является Алазанский артезианский бассейн, в Казахстане — Верхне-Илийский, Зайсанский и др.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПЛОЩАДИ КОНУСОВ ВЫНОСА

Этот тип промышленных месторождений подземных вод описываемой группы встречается в бассейнах напорных вод, формирующихся в предгорной зоне в рыхлообломочных песчано-галечниковых образованиях конусов выноса. Этот тип месторождений характерен для предгорных зон некоторых горно-складчатых областей Советского Союза и встречается, главным образом, в Средней Азии, Казахстане и на Кавказе. В последние годы месторождение описываемого типа было обнаружено в Восточной Сибири в долине р. Чары. Впервые гидрогеологические условия бассейнов напорных вод в конусах выноса были изучены и описаны в Средней Азии О. К. Ланге.

При выходе крупных речных долин из горных районов на предгорную равнину поверхностные потоки формируют мощные толщи рыхлых аллювиально-пролювиальных образований. В разрезе эти отложения представлены переслаиванием песчано-галечниковых отложений и суглинков (глин). Эта фильтрационная неоднородность в вертикальном разрезе определяет более целенаправленную постановку поисково-разведочных работ. Неоднородность механического состава пролювиальных толщ как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении создает условия для формирования в центральной и периферийной частях площади конусов выноса подземных вод напорного типа. В бассейне обычно присутствует несколько напорных водоносных горизонтов, имеющих одну общую область питания.

В условиях формирования подземных вод на площади конусов выноса четко выражена горизонтальная гидрогеологическая зональность (рис. 20). В вершине конуса выноса, непосредственно примыкающей к краевой части горного сооружения, находятся область питания и зона глубокого залегания уровня грунтовых вод (до 80 м, реже до 120 м). Аллювиально-пролювиальные отложения представлены здесь преимущественно хорошо проницаемыми галечниковыми образованиями.

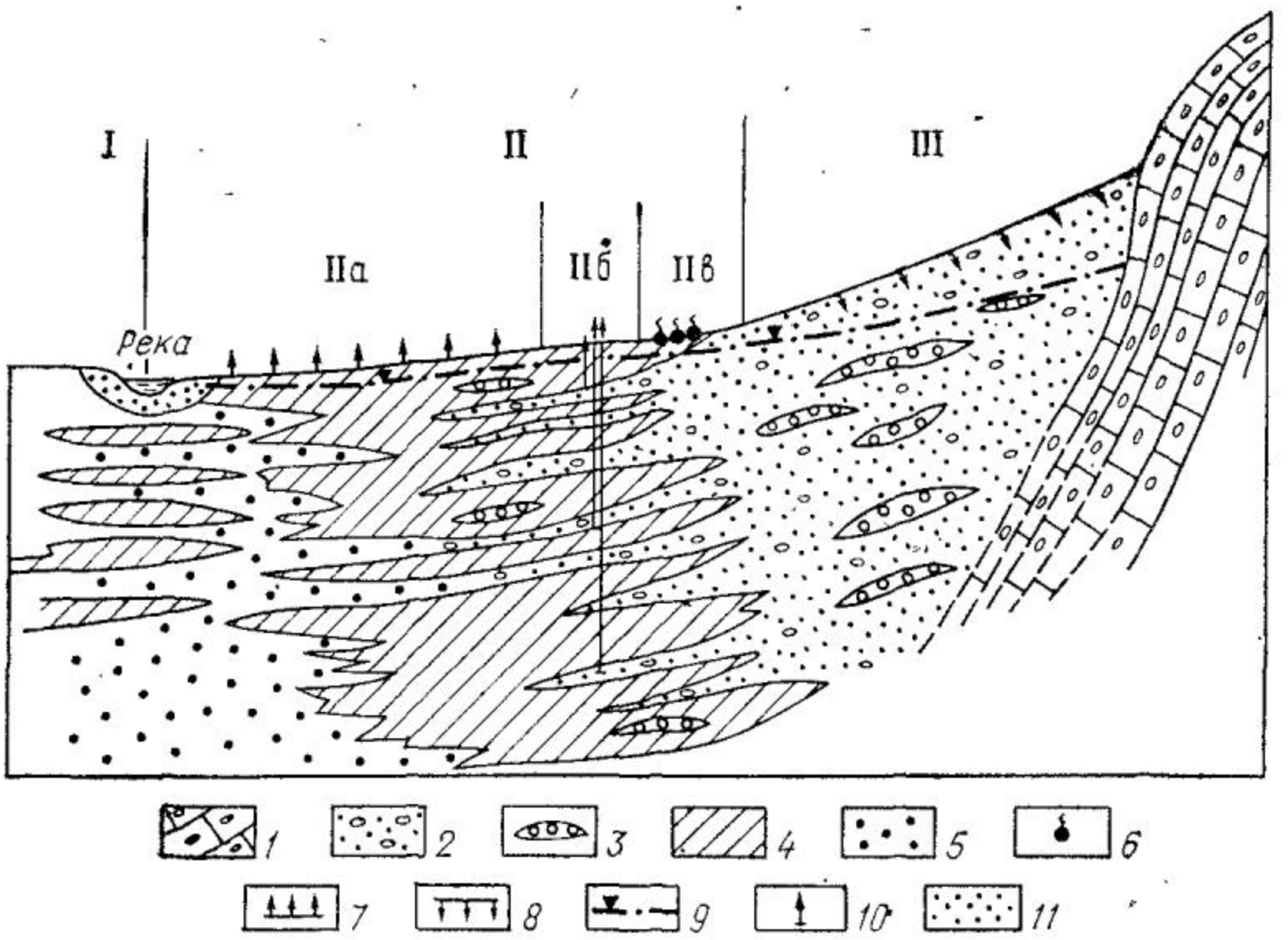


Рис. 20. Схема гидрогеологической зональности конусов выноса (по В. А. Гейнцу).

1 — отложения древнего конуса выноса (ташкентский комплекс); *2* — отложения современного конуса выноса (голодностепский комплекс); *3* — конгломераты глинистые; *4* — суглинки, глины; *5* — аллювиальные отложения главной реки (региональная дрена); *6* — родниковый сток; *7* — естественная разгрузка подземных вод в форме испарения; *8* — питание; *9* — уровень грунтовых вод; *10* — напоры; *11* — аллювиальные отложения. Зоны: I — регионального стока; II — формирования напора и естественной разгрузки (подзоны разгрузки: IIа — открытой, IIб — русловой, IIв — интенсивной родниковой); III — питания и транзитного стока

Вторая зона, расположенная примерно в центральной части конуса выноса, характеризуется расчленением единого потока подземных вод на несколько этажно залегающих галечниковых, хорошо проницаемых горизонтов, в которых воды по мере погружения приобретают избыточный гидростатический напор. Общая мощность пролювиальных отложений, в этой части может достигать 500 и более метров. В гидрогеологическом отношении она характеризуется формированием напорного режима и естественной разгрузкой подземных вод. На этом довольно широком фронте фильтрационного потока четко выделяются три подзоны: IIа — подзона интенсивной родниковой разгрузки, хорошо выраженная по площади в виде веерообразной поверхности; IIб — подзона русловой естественной разгрузки подземных вод на участках, где многочисленные современные русла реки (в дельтовой части) пропиливают слой слабо проницаемых покровных суглинков и обнажают водовмещающие галечниковые образования; IIв — подзона скрытой разгрузки, проявляющейся в виде вертикального стока подземных вод и их интенсивного испарения. В подзонах IIа и IIб обычно формируются довольно крупные родники с суммарными расходами от 2 до 15 м^3/с. Такие мощные родники указывают на большую регули-

ровочную емкость водоносных галечников, а также на значительные эксплуатационные возможности описываемого типа месторождений подземных вод. Гидрогеологическая зональность подземных вод на площади бассейна является главной особенностью описываемого типа месторождений, которую необходимо учитывать при постановке поисково-разведочных работ. Подземные воды месторождений конусов выноса имеют, как правило, источники питания, постоянно действующие за счет инфильтрации: а) речных вод на площади вершины конуса выноса, где распространена довольно мощная зона аэрации, залегающая на больших глубинах; б) атмосферных осадков, выпадающих непосредственно на площади конусов выноса; в) поверхностных вод ирригационных каналов. Предполагается, что на некоторых конусах выноса в республиках Средней Азии может быть еще один источник питания подземных вод — региональный подземный сток по зонам крупных тектонических нарушений, направленный со стороны примыкающих горных сооружений.

Как видно из этого описания, в мощной толще песчано-галечниковых отложений конусов выноса создаются весьма благоприятные условия для формирования крупных естественных ресурсов и запасов подземных вод. Обладая высокими коллекторскими свойствами, песчано-галечниковые образования играют роль огромной емкости, в пределах которой создается значительное природное подземное водохранилище. Месторождения подземных вод конусов выноса исключительно благоприятны для эксплуатации: в скважинах можно создавать большие понижения уровня и на отдельных участках организовывать интенсивный водоотбор системой взаимодействующих водозаборов, в том числе водозаборов ярусного типа с суммарными дебитами до 300 тыс. м^3/сут и более. Наиболее характерные в гидрогеологическом отношении промышленные месторождения подземных вод конусов выноса распространены в республиках Средней Азии, где они были впервые встречены и изучены. Например, на территории Ферганской долины известна своими крупными эксплуатационными запасами группа месторождений на площади Сохского и Исфаринского конусов выноса. На этих месторождениях эксплуатационные дебиты групповых водозаборов изменяются от 100 до 200 тыс. м^3/сут, а общие прогнозные запасы составляют более 3 тыс. м^3/сут. В Северной Киргизии вдоль Киргизского хребта на площади слившихся конусов выноса по фронту потока в 40—50 км были разведаны и оценены эксплуатационные запасы подземных вод (обеспеченные питанием) по сумме всех категорий около 1,2 млн. м^3/сут. Часть этих запасов в настоящее время используется для водоснабжения и орошения. Крупные месторождения напорных вод конусов выноса были выявлены в Казахстане и в Южном Казахстане вдоль подножья хребтов Кунгей и Терский Алатау, а также на Северном Кавказе.

Исходя из рассмотренных особенностей гидрогеологических условий, при изучении месторождений подземных вод конусов выноса целесообразно сосредоточить внимание в зоне формирования напорного режима. Эксплуатационные запасы подземных вод будут формироваться за счет естественных ресурсов и упругих запасов, а также в результате инфильтрации части поверхностных вод. Эксплуатационные запасы могут быть оценены гидродинамическим методом с помощью аналитических расчетов или моделирования.

В классификационной схеме, приведенной в табл. 4, выделен еще один подтип месторождений подземных вод, приуроченный к площади внутридолинных конусов выноса и выявленный в процессе проведения поисково-разведочных работ в Средней Азии.

Месторождения подземных вод этого подтипа распространены не в пределах предгорных шлейфов, как это имело место в описанном выше подтипе, а непосредственно внутри речной долины. На тех участках, где река, вырываясь из горных теснин, выходит в широкую часть межгорной долины, образуется внутридолинный конус выноса песчано-галечниковых образований, с которыми и связано формирование месторождения подземных вод.

Общие гидрогеологические условия месторождений этого подтипа мало отличаются от условий предгорных конусов выноса: внутридолинные конусы выноса имеют меньшие площади распространения и значительно меньшую общую мощность водоносных песчано-галечниковых отложений (до 150 м), в периферийной части внутридолинного конуса выноса четко выражена зона интенсивной естественной разгрузки подземных вод, основным источником их питания являются поверхностные воды реки.

В настоящее время выявлено несколько таких месторождений, главным образом, в речной сети второго и третьего порядка Ферганской котловины. Месторождения внутридолинных конусов выноса встречены также в долинах рек Чирчик и Ангрен в Узбекистане.

В гл. 22 на конкретном примере Сара-Булунского месторождения рассмотрены особенности разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод, формирующихся на площади внутридолинного конуса выноса.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В МЕЖМОРЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

В СССР на территории развития ледниковых четвертичных образований платформенного типа, в мощной толще рыхлых межморенных отложений, а также в отложениях конечных морен часто формируются мелкие бассейны напорных вод.

Эти бассейны отличаются небольшими размерами, однако

значительная мощность водосодержащих песчано-гравийных образований (достигающая иногда 130 м) и хорошие условия их питания (активная гидравлическая связь с поверхностными водами речной сети) создают благоприятную гидрогеологическую обстановку для формирования на площади бассейнов крупных естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод и создания высокопроизводительных водозаборных сооружений. В европейской части СССР наибольшее распространение обширных и мощных накоплений ледниковых образований отмечается в Белоруссии, Прибалтике, Карелии, Центральных районах, северо-восточной части Поволжья и т. д. (в районе г. Минска мощность ледниковых образований достигает 130 м, в районе г. Валдая 100 м). Иногда межморенные водоносные горизонты формируются в глубоких древних доледниковых долинах. Такие долины встречаются, например, на площади Московского, Прибалтийского и Ленинградского артезианских бассейнов. В практике эксплуатации и разведки месторождений напорных вод межморенных образований известны водозаборные участки, на площади которых суммарные дебиты скважин составляют от 30 до 80 тыс. м^3/сут. Таким образом, месторождения описываемого типа могут иметь большое промышленное значение.

В гидрогеологическом отношении мелкие бассейны напорных вод межморенных отложений характеризуются следующими условиями: а) в плане бассейн имеет четко выраженные границы, совпадающие с площадью распространения водоносных флювиогляциальных отложений; б) водовмещающими породами обычно являются пески, гравий, реже галечниковые образования, в механическом составе водоносных пород отмечается неоднородность, главным образом, в вертикальном разрезе; в) в толще песчано-гравийных отложений формируется один, реже два-три напорных водоносных горизонта (в последнем случае водоносные горизонты гидравлически связаны между собой); г) напорные воды на некоторых участках месторождения имеют активную гидравлическую связь с поверхностными водами (это обстоятельство создает благоприятные условия для формирования на водозаборных площадях дополнительных привлекаемых ресурсов подземных вод); д) водоносные горизонты очень часто обладают небольшими гидростатическими напорами (20—60 м).

Перечисленные природные условия определяют методику разведки месторождений напорных вод в межморенных отложениях. Эксплуатационные запасы напорных вод на водозаборных участках таких месторождений могут формироваться за счет: а) естественных ресурсов; б) упругих запасов; в) привлечения ресурсов из смежных водоносных горизонтов и инфильтрации поверхностных вод.

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИННО-ЖИЛЬНЫХ ВОД ЗОН ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

К этому типу отнесены месторождения, в пределах которых подземные воды формируются в зонах крупных тектонических нарушений. В отличие от всех ранее рассмотренных месторождений подземные воды описываемого типа залегают в форме линейно-вытянутых узких потоков, приуроченных к горным породам зон дробления, брекчирования или усиленной трещиноватости вдоль зон тектонических нарушений. В связи с этим на площади таких месторождений обычно аккумулируются ограниченные естественные ресурсы и запасы, поэтому они играют сравнительно меньшую роль в решении проблем хозяйственно-питьевого водоснабжения городов и промышленных объектов. Месторождения трещинно-жильных вод характерны преимущественно для районов горно-складчатых областей, где сложно дислоцированные толщи пород часто поражаются крупными тектоническими нарушениями, в том числе глубокого заложения и очень сложного строения. В платформенных областях месторождения этого типа встречаются реже.

Наиболее крупные месторождения трещинно-жильных вод в горно-складчатых областях нередко приурочены к региональным тектоническим нарушениям краевых частей горных сооружений, прослеживающихся по простиранию на расстояния в несколько сотен километров. В Средней Азии, например, к этому типу месторождений можно отнести мощные подземные потоки трещинно-жильных вод, формирующихся в пределах известной Копетдагской зоны тектонических нарушений. Здесь месторождения линейных потоков подземных вод приурочены к системе сопряженных тектонических нарушений глубокого заложения, имеющих сложные гидрогеологические условия. На значительном протяжении по простиранию структур подземные потоки трещинно-жильных вод частично выходят на поверхность в виде большой группы родников, суммарный расход которых достигает 40 тыс. $м^3$/сут. Часть потока трещинно-жильных вод имеет вдоль тектонических нарушений «слепой» выход непосредственно в галечниковую толщу четвертичных отложений, слагающих предгорный шлейф Копетдагского хребта.

Более широкое распространение в геосинклинальных областях имеют месторождения трещинно-жильных вод, формирование которых наблюдается в зонах тектонических нарушений внутрискладчатых структур (простые и сложные сбросы или надвиги нередко глубокого заложения). Очень часто месторождения такого типа встречаются на Урале, в Средней Азии, Казахстане и других областях, где ресурсы трещинно-жильных вод используются для организации водоснабжения городов и промышленных предприятий. Формирование подземных потоков трещинно-жильных вод, таким образом, связано со структурными особенностями тектонических нарушений, с условиями

образования в этих структурах физической среды, благоприятной для накопления и циркуляции подземных вод. Именно с учетом этих особенностей следует подходить к оценке водоносности различных типов тектонических нарушений.

Мощные зоны дробления, брекчирования или усиленной трещиноватости горных пород вдоль локальных трещинных структур являются той средой, в пределах которой концентрируются фильтрационные потоки (рис. 21). Кроме того, тектонические нарушения могут быть представлены тонкими структурными швами или слабо выраженной зоной дробления пород. Они могут быть выполнены также глиной трения. В двух последних случаях локальные трещины в гидрогеологическом отношении неблагоприятны для формирования промышленных типов месторождений трещинно-жильных вод.

Исследованиями было установлено, что наиболее благоприятная водопроницаемая среда относительно большой емкости образуется вдоль тектонических нарушений, поражающих карбонатные и интрузивные породы, а также грубослоистые песчаники. Очень часто зона дробления или брекчирования тектонических нарушений в этих породах достигает мощности 300 м. Именно в таких геолого-структурных условиях и формируются месторождения трещинно-жильных вод промышленного типа.

На Урале и в Центральном Казахстане существует несколько водозаборных сооружений, заложенных в сравнительно мощных зонах дробления тектонических нарушений в гранитах, эффузивах и карбонатных породах. На этих водозаборах эксплуатационные скважины имеют глубины от 80 до 120 м, на некоторых из них суммарный дебит взаимодействующих скважин достигает 30 тыс. $м^3$/сут.

Опыт разведки трещинно-жильных вод и осушения горных выработок на горнорудных предприятиях показывает, что в зонах тектонических нарушений, поражающих такие горные по-

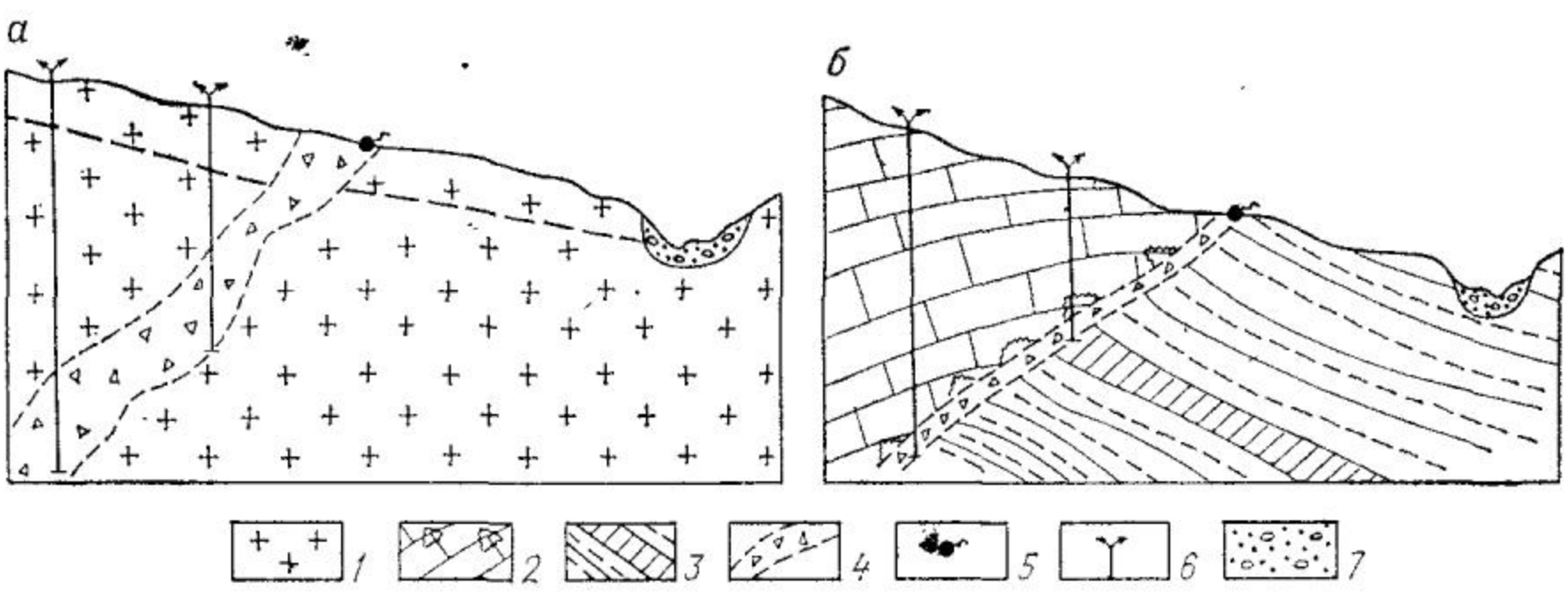


Рис. 21. Схематический разрез месторождения трещинно-жильных вод в интрузивных *(а)* и карбонатных *(б)* породах.

1 — интрузивные породы; *2* — известняки с карстовыми полостями; *3* — песчано-сланцевая толща; *4* — зона дробления; *5* — родники; *6* — скважины; *7* — галечники

роды, как сланцы, филлиты, эффузивы, роговики и им подобные, обычно формируются весьма ограниченные запасы трещинно-жильных вод, не имеющие промышленного значения. Поэтому такие месторождения вод по своим эксплуатационным возможностям не могут быть использованы для организации централизованного водоснабжения крупных объектов. Формируясь в пределах зон тектонических нарушений, подземные потоки трещинно-жильных вод при благоприятных условиях выходят на дневную поверхность в виде восходящих родников. Родники обычно фиксируются по простиранию тектонических нарушений линейно-вытянутой цепочкой, являясь своего рода поисковым критерием для обнаружения месторождений промышленного типа.

Родники зон тектонических нарушений отличаются следующими гидрогеологическими особенностями: 1) повышенным, по сравнению с другими родниками, приуроченными к зоне выветривания, дебитом, мало изменяющимся по сезонам года; 2) температура воды очень близка к среднегодовой температуре воздуха для данного района, а иногда превышает ее.

Таким образом, месторождения трещинно-жильных вод отличаются следующими гидрогеологическими особенностями: 1) они имеют линейно-вытянутую форму залегания в виде узких потоков подземных вод; 2) трещинно-жильные воды циркулируют на относительно большой глубине, измеряемой иногда сотнями метров, и в связи с этим часто имеют повышенную температуру (нередко на месторождении формируются термальные воды); 3) область питания трещинно-жильных вод расположена вдоль зоны тектонического нарушения непосредственно во вмещающих горных породах; 4) на месторождении формируются преимущественно естественные ресурсы трещинно-жильных вод, ввиду ограниченной свободной емкости водовмещающей среды естественные запасы трещинно-жильных вод обычно весьма незначительные.

Главная гидрогеологическая особенность месторождений трещинно-жильных вод заключается в сложности формирования фильтрационного потока, контуры которого, как и фильтрационные свойства пород, обычно резко изменяются как по простиранию, так и по падению тектонического нарушения. В связи с этим гидродинамический метод оценки эксплуатационных запасов не может быть применен для месторождений таких вод. Обычно оценку эксплуатационных запасов трещинно-жильных вод при их разведке приходится производить по данным длительных пробно-эксплуатационных откачек (гидравлическим методом).

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Среди месторождений пресных подземных вод, распространенных в области вечной мерзлоты, выделяются три наиболее распространенных промышленных типа месторождений (см. табл. 5).

Условия питания подземных вод в области распространения многолетнемерзлых пород более сложны, чем в гумидной и аридной зонах СССР. Однако и при затруднительных условиях формирования пресные подземные воды в области вечной мерзлоты имеют сравнительно большое распространение и относительно большие ресурсы. Опыт постановки поисково-разведочных работ, накопленный за последние 15—20 лет, подтверждает этот вывод.

Месторождения подземных вод подрусловых таликовых зон. Наибольший практический интерес по своим эксплуатационным возможностям представляют промышленные месторождения подземных вод первого типа, приуроченные к площади распространения безнапорных грунтовых вод песчано-галечниковых отложений речных подрусловых и подозерных таликовых зон (см. табл. 5). Такие месторождения распространены преимущественно в долинах крупных рек или в котловинах крупных озер, поверхностные потоки которых никогда не промерзают зимой до дна. В результате длительного теплового воздействия не промерзающих поверхностных вод под руслом реки, иногда на большую глубину (до 100 м), образуются талые породы, и в песчано-галечниковых аллювиальных или озерных образованиях формируется подземный поток грунтовых вод. Этот поток, как правило, имеет активную гидравлическую связь с поверхностными водами (рис. 22). Условия формирования подрусловых таликовых зон в речных долинах зависят от ряда факторов, и, прежде всего, от энергии теплового потока поверхностных вод реки, режима стока, структуры окружающей вечной мерзлоты и мощности песчано-галечниковых образований. Все это необходимо рассматривать в историческом аспекте для каждой речной долины отдельно. Естественные ресурсы и запасы подземных вод определяются размерами талика (мощность и площадь распространения), условиями питания (связь с поверхностными водами) и фильтрационными свойствами водовмещающих пород.

Наиболее характерные месторождения первого промышленного типа были выявлены, например, в долинах рек Лены и

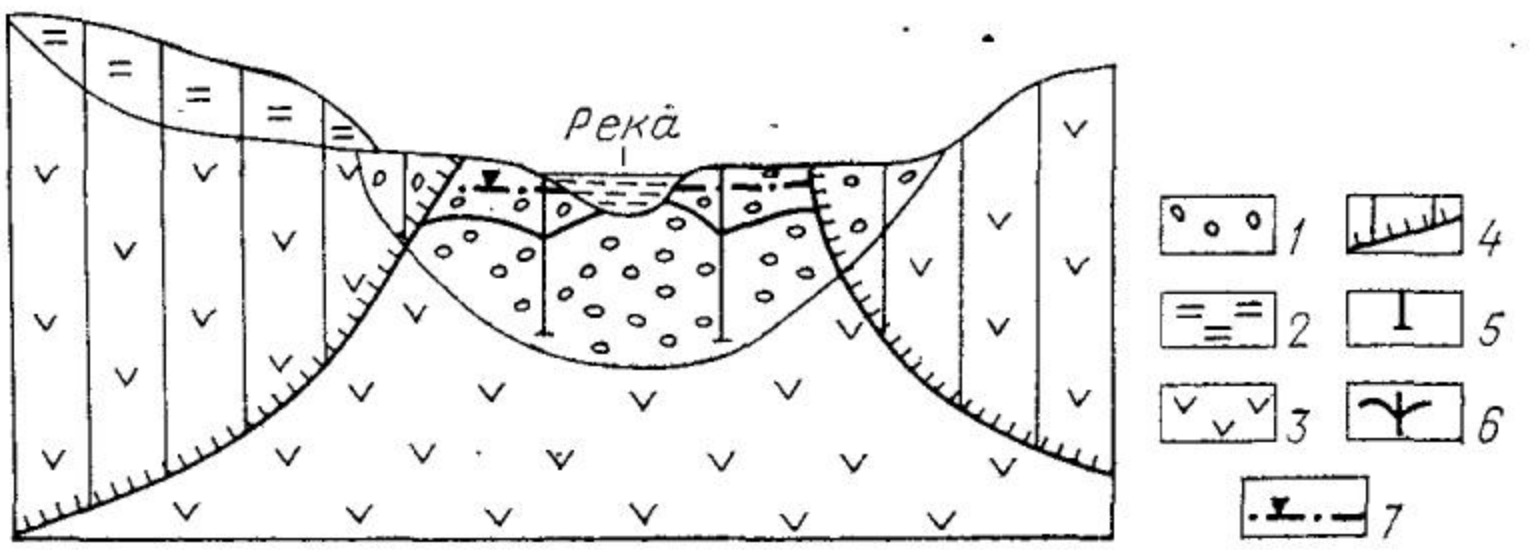


Рис. 22. Схематический разрез сквозного талика в речной долине.

1 — галечники; *2* — глины; *3* — коренные породы; *4* — многолетнемерзлые породы; *5* — скважины; *6* — депрессия; *7* — уровень грунтовых вод.

Колымы. Грунтовые воды подруслового талика р. Лены разведывались около г. Якутска. Бурение скважин производилось на площади Чапаловской протоки, непосредственно связанной с основным руслом непромерзающей до дна реки. Ширина потока пресных грунтовых вод оказалась здесь около 700 м, средняя мощность горизонта изменяется от 10—12 до 25—29 м. На базе выявленных ресурсов грунтовых вод организовано централизованное водоснабжение части г. Якутска. Аналогичные гидрогеологические условия были выявлены при разведке верхней части долины р. Колымы. Следует однако отметить, что эксплуатационные возможности месторождений подземных вод подрусловых таликовых зон в настоящее время слабо используются в народном хозяйстве.

В части постановки и проведения поисково-разведочных работ на месторождениях подземных вод речных таликовых зон можно отметить следующее. При проведении работ на стадии общих поисков, путем анализа материалов предыдущих исследований и материалов гидрометеослужбы СССР можно оценить принципиальную возможность обнаружения в изучаемом районе месторождений описываемого типа. Поисковыми признаками и критериями наличия таликовых зон в долинах рек могут быть своеобразный растительный покров, наличие полыньи, незамерзающих источников и наледи (особые признаки).

На стадии детальных поисков целесообразно провести на изучаемом объекте мерзлотно-гидрогеологическую съемку. Комплексная съемка, которую (масштаб 1 : 50 000 или 1 : 100 000) следует рассматривать как поисковый метод, должна включать геофизические, геоморфологические, геокриологические и гидрологические исследования, бурение поисковых скважин и т. д. На этой стадии очень важно изучить условия распространения и залегания (в плане и разрезе) многолетнемерзлых пород в долине реки, а также их температурный режим; определить глубину сезонного промерзания и протаивания горных пород, оконтурить таликовую зону (выявить ее мощность и строение), получить данные об уровенном режиме и расходе поверхностных вод в реке, особенно в зимнее время. Обязательным является детальное изучение наледей, данные об объеме которых могут быть использованы для оценки естественных ресурсов подземных вод. Поисковые скважины можно располагать по поперечникам долины, а одиночные выработки вдоль русла реки между поперечниками. Все поисковые скважины необходимо опробовать откачками, что позволит в первом приближении оценить фильтрационные свойства водоносных песчано-галечниковых пород. Особенно большое значение приобретают термометрические исследования всех буровых скважин. На стадии детальных поисков следует организовать изучение режима подземных вод и поверхностных вод.

На стадии предварительной разведки на перспективном участке должен быть проведен обычный комплекс

дополнительных разведочных и опытных работ. Кроме того, необходимо изучить емкостные свойства водовмещающих пород, которые в годовом цикле частично осушаются под влиянием естественных факторов (изменение условий питания от паводковых расходов реки до межени). Для определения фильтрационной неоднородности пород в вертикальном разрезе необходимо во всех разведочных скважинах провести расходометрические и резистивиметрические исследования. Должно быть продолжено изучение режима подземных и поверхностных вод. При детальных разведочных работах гидрогеологические скважины должны быть размещены на участке применительно к выбранной схеме будущего водозабора; опытно-фильтрационные работы (кустовые откачки) целесообразно проводить в зимнее время.

Следует отметить, что условия формирования запасов подземных вод на месторождениях подземных вод речных подрусловых таликовых зон до некоторой степени аналогичны условиям на месторождениях подземных вод в речных долинах гумидных и аридных областей, описанных выше. Эта аналогия позволяет использовать для оценки разведанных запасов месторождений подземных вод таликовых зон речных долин гидродинамический метод, а для определения обеспеченности источником питания — балансовый метод (95 %-ной обеспеченностью поверхностного стока). Вместе с этим изучение месторождений в области вечной мерзлоты имеет и некоторые особенности. Особенностью оценки разведанных запасов описываемых месторождений является необходимость решения прогнозных теплофизических задач с целью определения возможного изменения границ многолетнемерзлых пород в нарушенных условиях будущей эксплуатации подземных вод. Целесообразно также учитывать условия распространения таликовых зон в речной долине.

Второй подтип месторождений подземных речных таликовых зон (см. табл. 5) приурочен к древним речным долинам с периодически действующим поверхностным стоком и относительно ограниченной площадью таликовых зон (Талнах, Ергалах, Ингамикит, Наменга и др.). Особенности разведки и оценки запасов месторождений этого подтипа рассмотрены в гл. 5.

Месторождения напорных вод на площади частично промороженных мелких артезианских бассейнов. Несколько меньшее практическое значение по своим эксплуатационным возможностям имеют месторождения напорных вод частично промороженных мелких артезианских бассейнов. Целесообразно выделить два подтипа таких месторождений, приуроченных к площади: а) частично промороженных собственно мелких складчатых структур или тектонической депрессии (рис. 23); б) к площади частично промороженной обводненной трещиноватой зоны выветривания коренных пород. Исследованиями было установлено, что в процессе промерзания гидрогеологических массивов

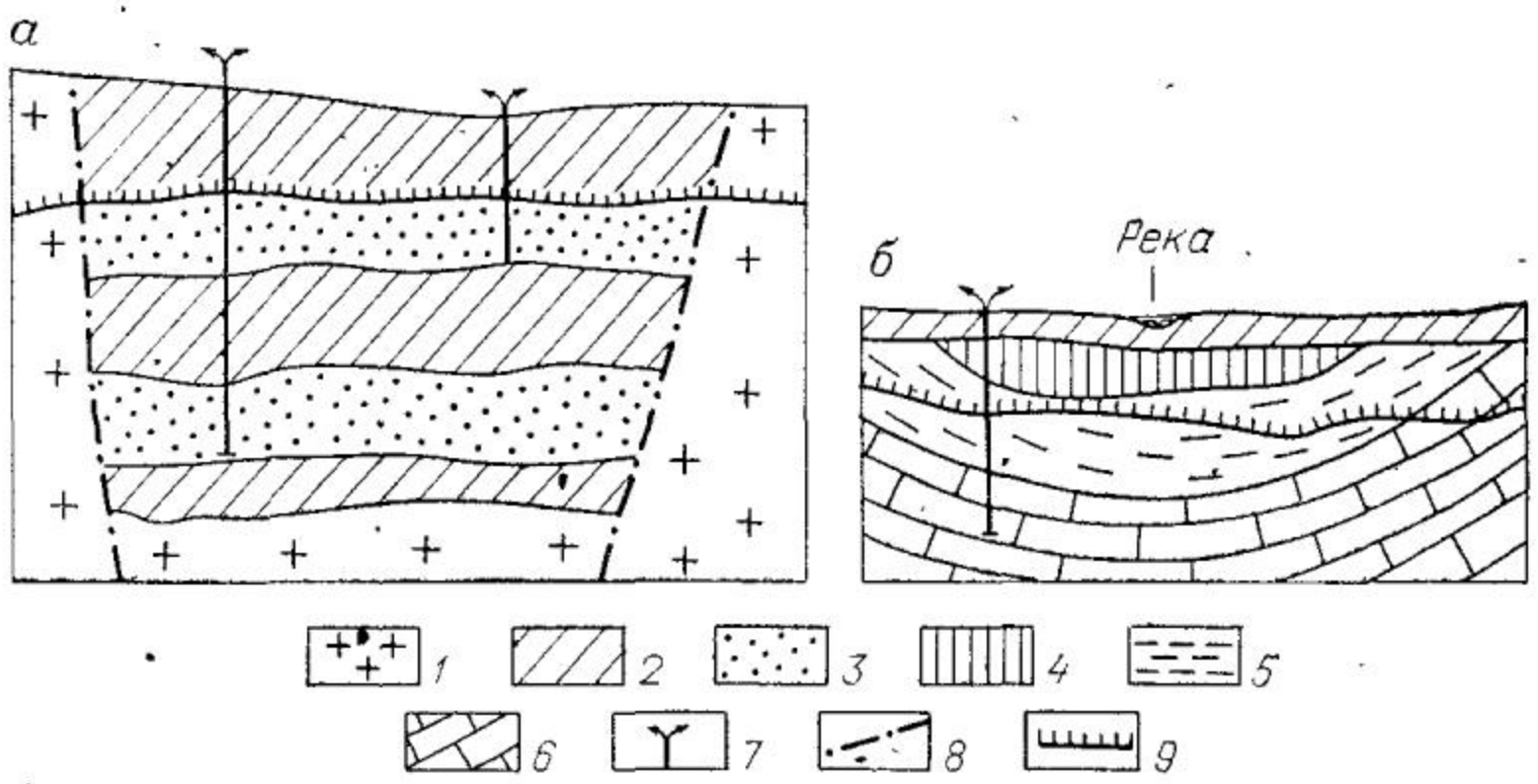


Рис. 23. Схематический разрез частично промороженных артезианских бассейнов:
а — в тектонической депрессии; *б* — в синклинальной складке. *1* — интрузивные породы; *2* — суглинки; *3* — пески; *4* — глины; *5* — сланцы; *6* — карбонатные породы; *7* — скважина; *8* — тектонические нарушения; *9* — нижняя граница вечной мерзлоты

на дне долин и тектонических депрессий в трещиноватых породах и складчатых структурах различного литологического состава (песчаники, известняки и др.) формируются водонапорные системы. Мерзлая зона в таких случаях служит водоупорной кровлей для водонапорных систем. В горно-складчатых областях Забайкалья и Северо-востока СССР выделяется несколько сложных бассейнов описываемого типа (так называемые частично промороженные артезианские бассейны и гидрогеологические массивы, по Н. И. Толстихину). На больших глубинах ввиду затрудненного подземного стока водоносной структуры подмерзлотные воды нередко имеют повышенную минерализацию и по составу непригодны для хозяйственно-питьевого водоснабжения (минерализация достигает 5 г/л и более).

На площади более мелких артезианских бассейнов юга Сибирской платформы (Верхнеленский, Читинский, Иркутский, Канский и Ангарский) пресные напорные воды формируются в палеозойских породах и отложениях мезозойского возраста. На площади частично промороженных Иркутского и Читинского артезианских бассейнов были разведаны месторождения напорных вод с эксплуатационными запасами на отдельных водозаборных участках до 20 тыс. м^3/сут. На месторождениях частично промороженных трещиноватых массивов эксплуатационные возможности обычно очень ограничены. Относительно большая мощность многолетнемерзлых пород (до 100 м и более) на месторождениях усложняет технологию проходки гидрогеологических скважин (требуется применение специальных не замерзающих растворов в обсадных трубах в зоне вечной мерзлоты), а также их эксплуатацию. Методика разведки месторождений разработана слабо. При изучении описываемого подтипа месторождений целесообразно учитывать следующие рекомендации.

1. На стадии общих поисков необходимо строго соблюдать первый общий принцип разведки — обоснованность постановки поисково-разведочных гидрогеологических работ. Эта задача может быть решена путем сопоставления заявленной потребности в воде с имеющимся опытом эксплуатации и потенциальными ресурсами изучаемого района.

2. На стадии детальных поисков рекомендуется провести комплексную мерзлотно-гидрогеологическую съемку в масштабе 1 : 50 000 или 1 : 100 000 на площади гидрогеологической структуры и на прилегающих участках с тем, чтобы охватить всю возможную область питания подземных вод. В состав комплексной съемки должны входить мерзлотные, гидрогеологические, геолого-структурные и гидрологические исследования. Перечисленные задачи можно решить с помощью рационального сочетания геофизических работ и бурения поисково-картировочных скважин. На базе данных термометрического обследования всех буровых скважин необходимо охарактеризовать условия распространения многолетнемерзлых пород на площади месторождения.

3. Оценку эксплуатационных запасов подмерзлотных подземных вод, ввиду сложности мерзлотно-гидрогеологических условий месторождения, целесообразно выполнять совместно гидравлическим и балансовым методом (см. гл. 16).

Месторождения подземных вод сквозных таликовых зон тектонических нарушений. Третий тип промышленных месторождений представлен напорными межмерзлотными водами сквозных таликов, приуроченных к зонам тектонических нарушений. Распространены эти месторождения преимущественно в горно-складчатых областях. В гидрогеологическом отношении межмерзлотные воды сквозных таликов очень часто играют транзитную роль, связывая подмерзлотные воды с надмерзлотными (рис. 24). Описываемый тип месторождений подземных вод характеризуется формированием линейно-вытянутых потоков. Наиболее часто водоносные сквозные талики можно встретить в области развития мощной толщи вечной мерзлоты, где они обусловливают ее прерывистость на отдельных участках.

По сравнению с другими месторождениями напорные межмерзлотные воды аккумулируют в сквозных таликах относительно ограниченные естественные ре-

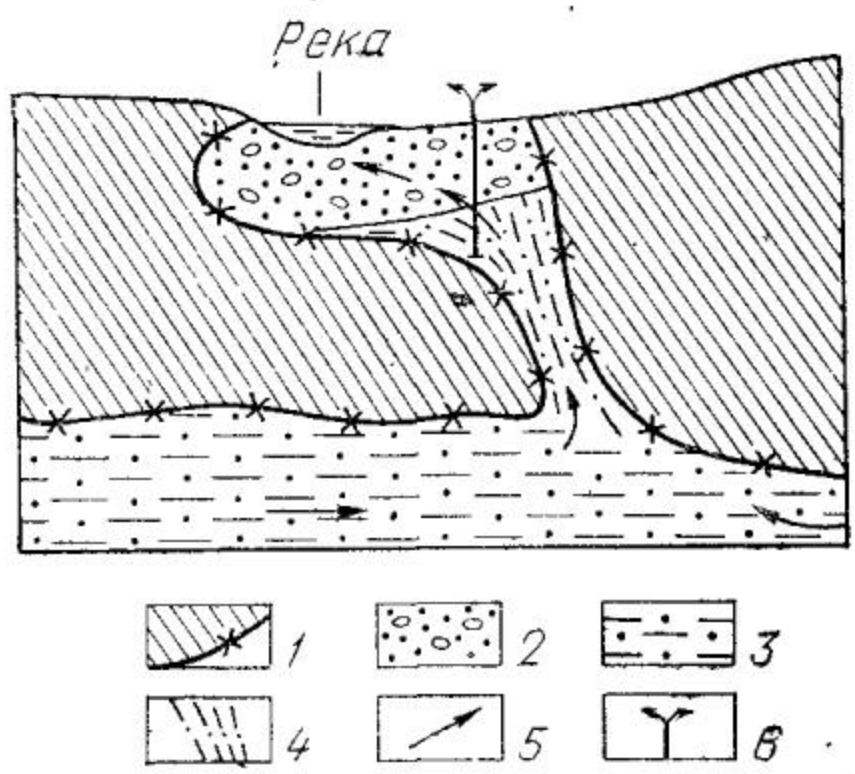


Рис. 24. Напорные воды сквозного талика зоны тектонических нарушений.

1 — вечномерзлые породы; *2* — песчано-гравийные отложения; *3* — горизонт подмерзлотных вод; *4* — межмерзлотные воды сквозного талика; *5* — направление потока подземных вод; *6* — фонтанирующая скважина

сурсы. Отдельные буровые скважины при разведке могут иметь дебиты в среднем 1500 м³/сут, а дебиты водозаборных сооружений достигают 10 тыс. м³/сут.

В некоторых случаях при наличии системы тектонических нарушений, к которым может быть приурочен мощный сквозной талик, на месторождениях формируются более крупные естественные ресурсы пресных подземных вод. Мерзлотно-гидрогеологические условия формирования естественных ресурсов и эксплуатационных запасов месторождений трещинно-жильных межмерзлотных подземных вод зон тектонических нарушений изучены очень слабо. Имеется небольшой опыт их эксплуатации. Сложность и слабая изученность месторождений предопределяют проведение оценки эксплуатационных запасов подземных вод гидравлическим методом (см. гл. 16), по результатам групповых опытных откачек; обеспеченность запасов устанавливается балансовым методом. Учитывая все это, в состав работ на стадии детальных поисков целесообразно включить комплексную мерзлотно-гидрогеологическую съемку, наземные геофизические исследования, картировочное и поисковое бурение скважин, опытно-фильтрационные работы, а также изучение качества и режима подземных вод. Объемы наземных геофизических исследований и поисково-картировочного бурения скважин целесообразно определять индивидуально для каждого конкретного объекта в зависимости от сложности и изученности района исследований. Очень важно на этой стадии более четко оконтурить границы распространения сквозной таликовой зоны (на основании детальных термометрических исследований всех пробуренных на месторождении скважин).

Раздел III.

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 7
ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Гидрогеологические работы по поискам и разведке месторождений подземных вод следует рассматривать как сложный научно-технический процесс, позволяющий с помощью методических и технических приемов выявить месторождения, изучить условия формирования подземных вод, оценить их эксплуатационные запасы и обосновать промышленное освоение. С этих позиций проведение поисково-разведочных работ требует большого объема знаний в области геологии, гидрогеологии, гидрологии, а также технических средств.

Поиски и разведка охватывают два тесно связанных между собой понятия: а) методику поисков и разведки месторождений; б) методику проведения основных видов гидрогеологических работ.

Первое понятие включает такие важные методические приемы, как обоснование стадийности в изучении объекта; выбор под разведку продуктивного водоносного горизонта; обоснование глубины разведки месторождения; выбор способов расположения в плане поисковых и разведочных скважин, расстояний между разведочными поперечниками и между скважинами в каждом разведочном поперечнике, системы и технологии бурения гидрогеологических скважин, рациональной схемы водозаборного сооружения для данных конкретных условий и т. д.

Методика проведения основных видов гидрогеологических работ включает методику проведения съемочных работ и опытно-фильтрационных работ, стационарных наблюдений за режимом подземных и поверхностных вод, геофизических исследований, балансово-гидрологических работ, санитарно-гигиенических исследований и т. д.

В теории и практике изучения различных типов месторождений подземных вод действуют общие принципы поисков и разведки: 1) принцип гидрогеологической обоснованности и экономической целесообразности постановки на каждом объекте поисково-разведочных гидрогеологических работ; 2) принцип стадийности, или последовательных приближений, изучения месторождений подземных вод; 3) принцип пол-

ноты исследований объекта, обеспечивающий обоснование категоризации разведанных запасов подземных вод в соответствии с требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14] (отнесение эксплуатационных запасов подземных вод к той или иной категории достоверности и степени разведанности); 4) принцип охраны окружающей (геологической) среды при длительной эксплуатации подземных вод, а также защиты их от истощения и загрязнений; 5) принцип минимальных затрат труда, времени, кредитов при разведке месторождений.

Первый принцип, как следует из его названия, строго регламентирует в каждом конкретном случае гидрогеологическое обоснование и экономическую целесообразность постановки поисково-разведочных работ в новых районах или на площади действующего водозабора. Он состоит как бы из двух разделов. Содержание первого раздела сводится прежде всего к обоснованию — постановке поисков и разведки месторождений пресных подземных вод в соответствии с заявленной потребностью в воде. Сущность его состоит в том, что на основе предварительного обобщения и анализа геологических и гидрогеологических материалов по району будущих исследований, а также на основе общих закономерностей формирования различных типов месторождений необходимо произвести прогнозную оценку, обосновывающую возможность обнаружения в заданном районе месторождения подземных вод промышленного типа, эксплуатационные возможности которого могут полностью или частично удовлетворять заявленную потребность конкретного объекта в воде. Нельзя проектировать разведочные работы в районах, где отсутствуют геологические и гидрогеологические предпосылки для формирования эксплуатационных запасов пресных подземных вод в масштабах месторождений промышленного типа. Накопленный в СССР опыт показывает, что соблюдение требований этой части принципа позволяет избежать неоправданной постановки поисково-разведочных работ в районах, где отсутствуют гидрогеологические условия для формирования крупных месторождений пресных подземных вод.

Вторая часть этого принципа предусматривает непосредственную оценку экономической целесообразности проведения поисков и разведки подземных вод в данном районе. Сущность этих требований состоит в том, чтобы доказать предпочтительность использования подземных вод по сравнению с другими возможными источниками водоснабжения (например, поверхностные воды реки, озера, водохранилища и др.) для данного объекта. Если подземные воды как возможный источник водоснабжения имеют в данном районе значительное преимущество перед другими источниками, экономическая целесообразность организации поисково-разведочных работ довольно просто доказывается предварительными соображениями и примерными расчетами конкурентной способности подземных вод. Такие предварительные соображения излагаются в программе или

проекте поисковых работ. В более сложной ситуации, когда два или три источника водоснабжения имеют примерно равные экономические показатели, доказательство конкурентной способности подземных вод, а следовательно, правомерности постановки поисково-разведочных работ целесообразно более подробно и всесторонне изложить в технико-экономическом докладе (ТЭД). ТЭД в таких случаях составляется геологоразведочной организацией совместно с заинтересованными проектными институтами.

Второй принцип является основополагающим научно-методическим приемом в изучении месторождений подземных вод, строго регламентирующим требования к постановке поисково-разведочных гидрогеологических работ. Сущность его состоит в последовательном накоплении данных о конкретном месторождении подземных вод, начиная с изучения общих условий формирования месторождения, прогнозной оценки естественных ресурсов и запасов и кончая количественной оценкой эксплуатационных запасов подземных вод, в том числе по высоким промышленным категориям, а также гидрогеологическим обоснованием промышленного освоения разведанного объекта. Именно поэтому геологоразведочный процесс изучения месторождений принято подразделять на несколько стадий.

Стадийность поисков и разведки регламентируется научно-методическими положениями, разработанными Министерством геологии СССР, а также требованиями действующей инструкции ГКЗ СССР по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод и содержанию материалов по подсчету разведанных их запасов.

В соответствии с этим принципом геологоразведочные работы на всех объектах должны проводиться в следующей последовательности (стадийности). Вначале в районе исследований проводятся поисковые работы — общие и детальные поиски, — а затем по мере выявления на площади исследований промышленных типов месторождений подземных вод на конкретном участке (водозаборном участке) осуществляется предварительная и детальная разведки. После сдачи месторождения в промышленное освоение на водозаборном участке должны быть продолжены исследования на стадии эксплуатационной разведки, в процессе которой изучают режим и опыт эксплуатации подземных вод.

Принцип последовательных приближений не только регламентирует стадийность в изучении месторождений подземных вод, но и диктует выбор методических приемов разведки и сочетание основных видов гидрогеологических работ, содержание которых определяет степень изученности объекта и достоверность разведки. В табл. 6 приводится краткая характеристика стадийности разведки месторождений подземных вод, перечень основных задач, решаемых на каждой стадии, а также методи-

Таблица 6. Характеристика стадий изучения месторождений подземных вод

Стадия	Подстадия	Задачи гидрогеологических исследований	Основные методические приемы решения гидрогеологических задач
I. Поиски	Общие поиски	Выявление общей гидрогеологической обстановки района исследований, распространения месторождений промышленного типа, прогнозных (внекатегорийных) эксплуатационных запасов подземных вод; обоснование постановки детальных поисковых работ	Обобщение и анализ имеющихся геологических, геофизических, гидрологнческих и гидрогеологических материалов, рекогносцировочное обследование, проведение ревизионных геофизических исследований, бурение одиночных поисковых скважин
	Детальные поиски	Выделение на перспективных участках продуктивных водоносных горизонтов; оценка эксплуатационных запасов подземных вод на площади месторождения и перспективных участков по категориям C_1 и C_2; обоснование постановки гидрогеологических работ на перспективных разведочных участках на стадии предварительной разведки	В простых гидрогеологических условиях необходимо проведение комплекса полевых поисковых гидрогеологических исследований; в районах со сложными гидрогеологическими условиями необходимо проведение комплексных исследований, а также использование метода поискового математического моделирования с целью оценки запасов и рационального размещения объема работ
II. Предварительная разведка	—	Изучение основных особенностей геолого-гидрогеологических условий месторождения в целом и разведочного участка (участков); оценка основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и разведанных запасов по категориям C_1 и B, а также предварительная оценка влияния намечаемого отбора подземных вод на состояние окружающей (геологической) среды. Оценка общих масштабов месторождений (общих эксплуатационных возможностей) с учетом заявленной потребности в воде; обоснование постаиовки дальнейших работ на выявленных участках	Проведение рационального комплекса полевых разведочных гидрогеологических исследований применительно к выявленному типу месторождений подземных вод. В сложных гидрогеологических условиях необходимо использование методов математического моделирования (по результатам предварительной разведки)

Продолжение табл. 6

Стадия	Подстадия	Задачи гидрогеологических исследований	Основные методические приемы решения гидрогеологических задач
III. Детальная разведка	—	Детальное изучение эксплуатационных запасов подземных вод для их оценки по промышленным категориям А и В, а также применительно к выбранной схеме водозаборного сооружения (в простых условиях методом аналитических расчетов, в сложных — методом моделнрования). Обоснование проектирования и строительства водозаборного сооружения на разведочном участке, а также рекомендации по защнте окружающей среды (в том числе подземных вод) от негативного влияния техногенных процессов	Проведение рационального комплекса полевых разведочных гидрогеологических работ
IV. Эксплуатационная разведка	Строительство водозаборного сооружения	Контроль за строгим соответствием проектных требований строительства водозабора и подготовка месторождения к промышленному освоению	Авторский надзор, ведение гидрогеологической документации на эксплуатационных выработках
	Эксплуатация водозаборного сооружения	Изучение опыта эксплуатации и сравнительная оценка прогнозных данных разведки с данными эксплуатации; перевод разведанных запасов на флангах месторождения в более высокие категории; переоценка запасов; охрана окружающей среды и защита подземных вод от истощения и загрязнений; обоснование рациональных условий эксплуатации подземных вод, переоценка запасов	Комплексное стационарное изучение нарушенного режима подземиых вод, техногенных процессов и, в случае необходимости, бурение дополнительных скважин (наблюдательных и эксплуатационных)

ческие приемы их решения. В связи с тем, что принцип стадийности является основополагающим в методике поисков и разведки подземных вод, его содержание подробно рассмотрено в главах 8 и 9.

Не меньшее значение для выбора методики поисков, разведки и оценки запасов подземных вод имеет принцип полноты исследований месторождений. Сущность его состоит в необходимости проведения работ с такой полнотой, которая обеспечивает обоснованное выделение той или иной категории разведанных запасов подземных вод (в соответствии с требованиями инструкции ГКЗ СССР) (табл. 7). Достоверность выявления эксплуатационных запасов подземных вод и общие принципы их разведки зависят от ряда природных факторов, основными из которых являются: 1) степень гидро-

Таблица 7. Группировка месторождений пресных подземных вод по степени

Группа месторождений	Характеристика группы	Природные	
		Литолого-структурные особенности	Источники формирования эксплуатационных запасов
Первая	С простыми гидрогеологическими и гидрохимическими условиями	Распространение преимущественно рыхлых водовмещающих горных пород; залегание пород спокойное; мощность продуктивного горизонта выдержана по площади	Могут быть изучены и оценены достаточно достоверно в процессе разведки
Вторая	Со сложными гидрогеологическими условиями	Относительно спокойное залегание водовмещающих пород; мощность продуктивного горизонта не выдержана по простиранию; распространены рыхлые, неравномерно трещиноватые и закарстованные породы	Часть источников может быть изучена в процессе разведки надежно, а часть — приближенно
Третья	С очень сложными гидрогеологическими условиями	Сложно дислоцированные водовмещающие породы неравномерно трещиноватые и закарстованные; мощность продуктивного водоносного горизонта не выдержана	Могут быть изучены в процессе разведки приближенно

геологической и гидрогеохимической сложности месторождения, позволяющая количественно оценить источники формирования, и в целом эксплуатационные запасы подземных вод (сложность гидрогеохимических и граничных условий фильтрационного потока в плане и разрезе и т. д.); 2) степень неоднородности фильтрационных свойств водовмещающих пород, определяющая возможность применения для данного месторождения того или иного метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод; 3) степень надежности прогнозной оценки качества подземных вод на длительный период их эксплуатации.

Учитывая это обстоятельство, в Инструкции ГКЗ СССР [14] все типы месторождений пресных подземных вод по степени сложности гидрогеологических условий для целей разведки подразделены на три группы (см. табл. 7).

сложности гидрогеологических условий для целей разведки

условия		
Фильтрационные свойства пород продуктивного горизонта	Прогноз изменения качества подземных вод	Распространение месторождений
Относительно однородные в плане и разрезе, изменения коэффициента фильтрации в 5 раз в пределах разведочных участков	Может быть дан обоснованный прогноз	В речных долинах с постоянным источником восполнения запасов (избыточным поверхностным стоком); на площади конусов выноса, артезианских бассейнов платформенного типа и горно-складчатых областей
Неоднородные изменения коэффициента фильтрации более чем в 10 раз на площади разведки (например в трещиноватых и закарстованных породах)	Может быть дан приближенный прогноз расчетным путем (в сложных гидрогеохимических условиях)	В речных долинах с периодическим восстановлением запасов; в погребенных речных долинах и замкнутых артезианских бассейнах, в линзах пресных подземных вод пустынь некоторые объекты на площади артезианских бассейнов платформенного типа
Весьма неоднородные по простиранию и падению (коэффициент фильтрации может изменяться на площади месторождения более чем в 10 раз)	В процессе разведки может быть дан ориентированный прогноз	Трещинно-карстовые воды в горно-складчатых областях, не связанные с поверхностными водами; в зонах тектонических нарушений, сквозных таликах в области развития вечной мерзлоты и т. д.

Для каждой из выделенных в табл. 7 групп месторождений подземных вод Инструкцией ГКЗ СССР [14] установлены требования к их разведке и обоснованию той или иной категории разведанных запасов подземных вод (см. гл. 15).

Большое значение для оценки условий промышленного освоения разведанных запасов подземных вод на месторождении имеет принцип охраны окружающей (геологической) среды при длительной их эксплуатации, а также защита подземных вод от истощения и загрязнения. По своему содержанию этот принцип состоит из двух разделов. Первый раздел содержит требования, связанные с обоснованием предупредительных мероприятий по охране окружающей среды от негативного влияния техногенных процессов при длительной эксплуатации крупных систем водозаборных сооружений. Второй раздел предусматривает защиту подземных вод от загрязнений и истощения.

Современный этап хозяйственного освоения подземных вод как источника централизованного водоснабжения и орошения характеризуется интенсивным их отбором преимущественно системой крупных групповых сосредоточенных и взаимодействующих между собой водозаборов. При такой эксплуатации подземных вод в сфере влияния водозаборов всегда происходит значительное нарушение естественных гидрогеологических и инженерно-геологических условий. Как правило, эти изменения имеют место на площади развития депрессионной воронки, особенно в ее центральной части. Эти нарушения в окружающей среде происходят вследствие развития техногенных процессов (дренирование влаги на площади депрессионной воронки, осушение части безнапорного водоносного горизонта, изменение режима взаимосвязи подземных и поверхностных вод, вторичная консолидация осушенных рыхлых пород, развитие суффозионно-карстовых явлений в карбонатных породах и др.). Негативное влияние техногенных процессов приводит к изменению, прежде всего, геологической, а нередко и окружающей среды в целом. Именно поэтому на площади развития депрессионной воронки изменения могут привести к ухудшению экологических и ландшафтных условий, к деформации поверхности и поверхностных сооружений, ухудшению качества подземных вод и т. д.

Механизм развития техногенных процессов на водозаборных участках изучен очень слабо; недостаточно разработаны и гидрогеологические основы мероприятий по защите геологической и окружающей среды в целом от негативного воздействия этих процессов. Отсюда и возникает необходимость проведения гидрогеологических исследований при разведке и эксплуатации подземных вод в указанных направлениях. Техногенные гидрогеологические процессы представляют собой совокупность тесно связанных между собой и взаимно обусловленных гидрогеологических, инженерно-геологических, физико-химических и биогеохимических процесов, возникающих

при эксплуатации подземных вод на водозаборных сооружениях. Понятие окружающая среда является очень емким и обобщающим: содержание его определяется конкретно поставленной задачей. Например, при оценке условий обитания и производственной деятельности человека окружающую среду следует рассматривать как природную обстановку (материальную систему), в которой все слагающие ее компоненты (атмосфера — гидросфера — литосфера — почва — животный и растительный мир) постоянно находятся в сложном взаимодействии. Окружающую среду как комплексный объект изучает большая группа взаимосвязанных наук. Ведущей наукой является экология, которая в последнее время стала комплексной наукой, изучающей условия взаимодействия социально организованного общества с природой. Каждый компонент окружающей среды может детально изучаться (в условиях их взаимодействия) соответствующими науками. Именно поэтому следует признать правомерность существования гидрогеологических аспектов общей проблемы охраны и защиты окружающей среды.

Геологическую среду следует рассматривать как неотъемлемую часть окружающей среды, как материальную систему, компоненты которой (горные породы — подземные воды — микроорганизмы — природные газы), слагая верхнюю часть гидрогеосферы, постоянно находятся во взаимодействии в естественных и нарушенных условиях. Свойства каждого компонента геологической среды в отдельности в настоящее время исследованы достаточно детально. Однако условия их взаимодействия при длительной эксплуатации подземных вод изучены слабо. Отсюда возникает необходимость в изучении геологической среды не только при разведке месторождений, но и в период длительной эксплуатации, когда весьма интенсивно проявляются техногенные процессы.

Целесообразно выделить природную геологическую среду, не затронутую техногенными изменениями, и природно-техногенную геологическую среду, существенно измененную под влиянием техногенных процессов.

Формы интенсивной эксплуатации подземных вод определили в разведочной гидрогеологии выделение второго раздела описываемого принципа — защиту подземных вод от истощения и загрязнения. Истощение запасов пресных подземных вод на водозаборном участке — понятие емкое. В общем случае истощение запасов продуктивного водоносного горизонта является следствием нерациональной их эксплуатации, когда на водозаборном участке отбор подземных вод превышает общую величину разведанных и утвержденных запасов, т. е. снижение уровня подземных вод в скважинах при эксплуатации превышает расчетное значение, установленное при оценке запасов. В этих условиях процесс истощения запасов на водозаборном участке всегда характеризуется общей тенденцией интенсивного

снижения уровня подземных вод в продуктивном водоносном горизонте. Это снижение обычно четко фиксируется на графиках режима уровней. В других случаях наряду со снижением уровня по ряду причин может произойти существенное ухудшение качества подземных вод (подтягивание к водозаборным скважинам подземных вод повышенной минерализации, изменения под влиянием биогидрогеохимических процессов и т. д.).

В безнапорном водоносном горизонте процесс истощения характеризуется не только сработкой естественных запасов и снижением уровня подземных вод на водозаборном участке, но и значительным осушением водовмещающих пород, уменьшением их мощности, формированием искусственной зоны аэрации. В напорном водоносном горизонте, имеющем иные граничные условия потока в разрезе, эти процессы проявляются иначе. В начале интенсивного водоотбора, т. е. в первую фазу, отмечается непрерывное снижение пьезометрического напора, при этом сохраняется мощность напорного водоносного горизонта и происходит сработка естественных упругих запасов подземных вод. В дальнейшем, во вторую фазу, когда уровни подземных вод на водозаборном участке будут ниже отметки кровли напорного горизонта, начнется частичное осушение продуктивного горизонта и формирование на водозаборе напорно-безнапорного режима фильтрации потока.

В практике использования подземных вод могут быть выявлены такие гидрогеологические условия, когда на месторождении формируются преимущественно естественные запасы. В таких случаях, по мнению Н. Н. Биндемана, при необходимости следует подходить к эксплуатации запасов так же, как к использованию других твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых, т. е. планировать отбор подземных вод, как добычу невосполняемых запасов угля, железных, полиметаллических руд и т. д. Ограничение отбора подземных вод в этих условиях значительно занизило бы эксплуатационные возможности месторождения. Совершенно очевидно, что возникает необходимость рассчитать срок эксплуатации водозабора. В таких условиях на участке происходит истощение подземных вод при заданном режиме их отбора на объекте.

Наиболее эффективным способом защиты эксплуатационных запасов подземных вод от истощения является искусственное восполнение. В настоящее время этот способ начинает широко применяться при эксплуатации крупных водозаборных сооружений. Именно поэтому в некоторых случаях целесообразно на различных стадиях разведки месторождений проводить комплексные исследования с целью оценки источников искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод с тем, чтобы заранее выяснить способы их защиты от истощения.

Второй раздел принципа охраны окружающей (геологической) среды имеет большое значение для оценки эксплуатацион-

ной возможности разведываемого месторождения. Сущность этой части принципа состоит в необходимости проведения достоверной прогнозной оценки качества подземных вод на весь период проектируемой эксплуатации водозаборного сооружения. В процессе разведки прежде всего необходимо обосновать в гидрогеологическом и санитарно-бактериологическом отношении организацию на будущем водозаборном участке зон санитарной охраны (зона строгого режима и охранная зона второго пояса). Исследования в этом направлении, как правило, проводятся гидрогеологической службой совместно с санитарной инспекцией, по результатам таких работ составляется совместное заключение.

Принцип минимальных затрат труда, времени и средств при проведении разведки месторождений заключается в том, чтобы при минимальных затратах труда, времени и средств обеспечить решение поставленных перед разведкой задач, не снижая при этом достоверность полученных результатов. Сокращение сроков разведки месторождений и своевременная подготовка объекта к промышленному освоению имеют принципиальное значение на современном этапе проведения всех видов гидрогеологических исследований.

Необходимыми условиями повышения эффективности гидрогеологических работ, вытекающими из требований этого принципа, являются тщательный анализ гидрогеологических материалов по районам исследований на стадии проектирования поисково-разведочных работ, выполнение прогнозной оценки степени гидрогеологической сложности месторождения, намеченного под разведку; учет имеющегося по району исследований опыта эксплуатации подземных вод (на действующих водозаборах). В результате может быть решен вопрос об объединении во времени отдельных стадий поисков и разведки месторождений подземных вод и др.

Глава 8

ПОИСКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩИЕ ПОИСКИ

Поисковые работы могут проводиться для оценки: 1) общих перспектив и эксплуатационной возможности отдельных регионов, когда отсутствуют данные по конкретным водопотребителям; 2) общей эксплуатационной возможности региона в целом в условиях конкретного водопотребителя проектируемых или действующих объектов. На основании выполненных работ подстадии общих поисков должны быть: а) представлены характеристики общих гидрогеологических условий района и общих условий формирования естественных и эксплуатационных запасов подземных вод; б) выделены перспективные площади и продуктивные водоносные горизонты; в) дана в предваритель-

ном виде количественная оценка прогнозных эксплуатационных запасов; г) обоснована постановка дальнейших исследований.

Для слабо изученных в гидрогеологическом отношении районов по первому направлению работ на перспективных участках должны быть выполнены ориентировочные расчеты по региональной оценке внекатегорийных эксплуатационных запасов подземных вод (общие перспективные запасы) с целью обоснования постановки работ в объеме детальных поисков. Для относительно хорошо изученных районов и тем более для районов, где накоплен опыт эксплуатации подземных вод в условиях конкретного водопотребления отдельных объектов, региональная оценка эксплуатационных запасов подземных вод должна быть выполнена по степени достоверности, отвечающей преимущественно категории C_2 (в редких случаях по категориям C_2 и C_1).

Результаты такой оценки должны быть положены в обоснование дальнейшей постановки предварительной разведки, минуя стадию детальных поисков.

На стадии общих поисков должны быть собраны и систематизированы материалы предыдущих исследований по региону, характеризующие геологическое строение, гидрогеологические условия, режим поверхностного стока и т. д. Прогнозная оценка запасов региона выполняется на основании обобщения и анализа собранного материала.

Перечисленные выше задачи по оценке перспективных площадей в регионе поисковых исследований целесообразно решать методом составления прогнозной карты, например в масштабе 1 : 200 000, районирования по условиям формирования эксплуатационных запасов подземных вод. На такой прогнозной карте целесообразно не только выделить перспективные площади для постановки дальнейших поисково-разведочных работ, но и произвести своего рода выбраковку бесперспективных площадей, в пределах которых отсутствуют природные условия, благоприятные для формирования месторождений подземных вод промышленного типа.

Для прогнозной оценки перспективных площадей в пределах крупных, относительно хорошо изученных регионов на стадии поисковых работ в Советском Союзе разработана методика математического моделирования процессов формирования подземных вод на современных машинах (АВМ и ЭЦВМ) [8, 12, 18, 17]. Этот метод региональной оценки эксплуатационных запасов подземных вод, основанный на анализе и обобщении имеющихся материалов, можно назвать *методом поискового моделирования* в разведочной гидрогеологии. Накопленный в этом направлении опыт работ показал весьма положительные результаты и позволил оценить по площади крупных бассейнов запасы главным образом по категории C_2 и реже C_1, что значительно повысило эффективность постановки большого комплекса поисково-разведочных работ.

ДЕТАЛЬНЫЕ ПОИСКИ

Завершающим этапом поисковых работ являются детальные поиски, обычно выполняемые в пределах перспективных площадей, оценка которых была произведена на стадии общих поисков. Назначением детальных поисков является выявление на перспективных площадях собственно месторождений подземных вод промышленного типа, ориентированная оценка их эксплуатационных запасов, а также выбор конкретных участков для проведения работ на последующей стадии (предварительная разведка).

В связи с таким назначением исследования во время детальных поисков выполняются с помощью целого комплекса полевых геолого-гидрогеологических работ. В этот комплекс может входить гидрогеологическая съемка — как метод поисковых работ. Объем, площадь и масштаб детальных поисково-съемочных работ определяются степенью геологической и гидрогеологической изученности и степенью сложности района, заявленной потребностью в воде, наличием в районе опыта эксплуатации подземных вод и т. д. При отсутствии в районе геологической основы соответствующего масштаба целесообразно выполнить на площади поисков комплексную геолого-гидрогеологическую съемку в масштабах 1 : 200 000, 1 : 100 000 и в отдельных случаях масштаба 1 : 50 000. Для районов, на площади которых предполагается наличие месторождений напорных вод конусов выноса или подземных вод речных долин, в комплекс поисково-съемочных работ необходимо включать геоморфологическую съемку.

Такие комплексные съемочные работы относятся к категории специализированной съемки и должны проводиться в пределах границ геологических или гидрогеологических структур и прилегающих площадей, где предполагается распространение крупных месторождений подземных вод промышленного типа и намечается оценить общие условия формирования ресурсов пресных подземных вод. Исследования по комплексной съемке необходимо сопровождать: а) наземными и каротажными геофизическими исследованиями, необходимыми для решения задач, связанных с оценкой условий формирования ресурсов подземных вод и выявлением наиболее перспективных участков; б) дистанционные аэро- и космическими региональными исследованиями, результаты которых дают возможность в значительной степени уточнить границы распространения геологических или гидрогеологических структур, благоприятных для формирования месторождений подземных вод промышленного типа; в) гидрологическими исследованиями на площадях тех перспективных районов, где предполагается установить связь месторождений подземных вод с поверхностными водами, а также изучить роль поверхностных вод в формировании естественных ресурсов подземных вод. В некоторых районах гидрологические

исследования целесообразно сопровождать предварительными балансово-гидрометрическими работами.

В современных условиях немыслимо проведение комплекса поисковых работ без применения геофизических исследований. Геофизические исследования должны рассматриваться как один из основных методов выявления месторождений подземных вод на стадии поиска. В настоящее время в арсенале геофизических исследований имеется довольно много различных методов, которые могут быть успешно применены при поисково-разведочных гидрогеологических работах. Главное условие использования региональных геофизических исследований при поисках состоит в том, что площадные геофизические работы должны выполняться до проходки гидрогеологических скважин, в том числе скважин картировочного назначения. Только при максимальном использовании геофизической разведки можно оптимально использовать минимальный объем бурения скважин при съемке для решения главной задачи поисков — оконтуривания перспективных площадей возможного распространения месторождений подземных вод. Результаты геофизической разведки должны по существу направлять и корректировать план размещения поисковых и картировочных скважин. Этому главному положению о размещении объемов бурения не противоречит то, что в ряде случаев на площади поисков приходится производить бурение опорных и параметрических скважин с целью повышения степени достоверности геофизических исследований.

Возможности применения полевых и каротажных геофизических методов при гидрогеологической съемке и изучении месторождений подземных вод и их разрешающая способность рассмотрены в гл. 10.

Поиски крупных месторождений пресных подземных вод с помощью бурения гидрогеологических скважин являются наиболее надежным методом, так как позволяют однозначно (по фактическим данным) оконтурить перспективные площади и выбрать для изучения продуктивный водоносный горизонт. Поэтому бурение гидрогеологических скважин представляет собой обязательный вид работ, призванный совместно с опытно-фильтрационными исследованиями завершать решение главной задачи поисков. Вследствие этого объем бурения на поисковой площади необходимо размещать таким образом, чтобы данные по скважинам различного назначения (картировочные, структурные и собственно гидрогеологические) способствовали решению главной задачи поисков. Основой для размещения объемов буровых работ по площади, на которой проводятся детальные поиски, являются: а) данные о геолого-структурных условиях района; б) материалы наземных геофизических исследований; в) накопленный опыт поисково-разведочных работ, проведенных в аналогичных гидрогеологических условиях и в других районах; г) опыт эксплуатации подземных вод (нали-

чие на площади исследований действующих водозаборных сооружений и режим их эксплуатации).

Объем буровых работ, осуществляемых в ходе детальных поисков, чаще всего размещается по поисковым профилям с таким расчетом, чтобы можно было в дальнейшем охарактеризовать распространение перспективных участков, изменение по простиранию мощности выбранного продуктивного водоносного горизонта и фильтрационные свойства водовмещающих пород. Главные гидрогеологические требования к проведению буровых работ на изучаемой площади заключаются в том, чтобы на каждой скважине (независимо от ее назначения) был произведен комплекс гидрогеологических исследований, в том числе геофизические каротажные работы, а также качественное и количественное опробование продуктивного водоносного горизонта. Большое значение для составления прогнозной оценки перспектив поисковой площади имеют гидрогеологические данные, которые могут быть получены по ранее пробуренным скважинам, действующим водозаборам или дренажным устройствам. Материалы о режиме эксплуатации действующих водозаборов или дренажных устройств могут стать основой для проведения методом аналогии прогнозной оценки региональных эксплуатационных запасов подземных вод в целом по поисковой площади.

На основании выполненных в ходе детальных поисков полевых гидрогеологических исследований проводится камеральная обработка собранных материалов и составляется отчет. В процессе обобщения и анализа этих материалов должны быть оконтурены перспективные участки, дана прогнозная оценка эксплуатационных запасов подземных вод на этих участках, определено качество подземных вод выбранного продуктивного горизонта, установлена экономическая целесообразность и очередность дальнейшего изучения подземных вод перспективных участков.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОИСКОВЫХ КРИТЕРИЕВ И ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Для прогнозной оценки изучаемой территории, которая составляется на первой стадии исследований, большое значение имеет правильное использование поисковых гидрогеологических критериев и признаков, используемых для характеристики общих закономерностей формирования и обоснования возможности обнаружения промышленных месторождений пресных подземных вод. Под поисковыми критериями следует понимать такие природные факторы, нередко проявляющиеся в совокупности (геоморфологические, литологические, геолого-структурные, гидрогеологические и др.), которые прямо указывают на возможность обнаружения промышленных типов месторождений пресных подземных вод на площади поисковых исследований.

Таблица 8. Поисковые критерии и признаки для промышленных типов

Типы месторождений	Подтипы месторождений	Критерии и Глав						
		геоморфологический	гидрогеологический	литологический	геофизический	ботанический	геолого-структурный	
Месторождения речных долин	Широких и узких речных долин	Наличие мощной водоносной толщи песчано-галечных аллювиальных образований	Связь поверхностных и подземных вод, наличие поверхностного стока	Песчано-галечный состав пород продуктивного горизонта	—	—	—	
	Древних погребенных речных долин	Наличие древних погребенных долин	То же	То же	Аномалии полей, позволяющие установить условия распространения и контуры перспективных участков	—	—	
Месторождения трещинно-карстовых вод в карбонатных породах		—	»	Наличие водоносных карбонатных пород, трещиноватых и закарстованных	То же	—	—	

месторождений подземных вод

признаки								Области распространения критернев и признаков
ные		Второстепенные						
	стратиграфический	гидрогеологический	гидрогеологический	геофизический	гидрогеологический	геоморфологический	гидрогеохимический	
	—	—	Естественная разгрузка грунтовых вод в виде крупных родников на надпойменной террасе в местах сужения долин	Аномалии полей, позволяющие установить условия залегания н мощность продуктивного горизонта	—	—		Платформенные и горно-складчатые области
	—	—	—	—	—	—	Наличне двух типов подземных вод — пресных и минерализованных	То же
	—	—	—	—	Естественная разгрузка в виде родников	—	—	Преимущественно в горно-складчатых областях

Продолжение табл. 8

Типы месторождений	Подтипы месторождений	Критерии и Глав						
		геоморфологический	гидрогеологический	литологический	геофизический	ботанический	геолого-структурный	
Месторождения на площади распространения линз пресных подземных вод	—	—	Связь поверхностных и подземных вод, наличие поверхностного стока	—	Аномалии полей, позволяющие установить условия распространения и контуры перспективных участков	Наличие специфической растительности	—	
Месторождения напорных вод артезианских бассейнов	Платформенных областей	—	То же	—	—	—	—	
	Горно-складчатых областей	Наличие межгорной впадины, складок второго и третьего порядков	»	—	—	—	—	
Месторождения напорных вод по площади конусов выноса	—	Наличие конусов выноса	Связь поверхностных и подземных вод	Песчано-галечный состав пород	—	—	—	

признаки								Области распространения критериев и признаков
ные		Второстепенные						
	стратиграфический	гидрогеологический	гидрогеологический	геофизический	гидрогеологический	геоморфологический	гидрогеохимический	
	—	—	—	—	—	—	—	В аридной зоне вдоль крупных ирригационных каналов
	Большие мощности водоносного горизонта	—	—	—	Естественная разгрузка напорных вод в виде постоянно действующих родников		—	На площади артезианских бассейнов платформенного типа
	Присутствие продуктивных пластов	—	—	—	То же	—	—	В горно-складчатых областях
	—	Ежегодное пополнение естественных ресурсов подземных вод	—	—	—	—	—	В предгорных зонах горно-складчатых областей

Продолжение табл. 8

Типы месторождений	Подтипы месторождений	Критерии и Глав						
		геоморфологический	гидрогеологический	литологический	геофизический	ботанический	геолого-структурный	—
Месторождения напорных вод по площади конусов выноса	—	Наличие конусов выноса	Связь поверхностных и подземных вод	Песчано-галечный состав пород	—	—	—	
Месторождение трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений	—	—	—	Трещиноватость пород зон тектонических нарушений	Аномалии полей, позволяющие выявить обводненные и трещиноватые участки	—	Наличие зон тектонических нарушений	
Месторождения напорных вод флювиогляциальных межморенных отложений	—	—	Связь поверхностных и подземных вод	—	—	—	—	

признаки							Области распространения критериев и признаков
ные		Второстепенные					
стратиграфический	гидрогеологический	гидрогеологический	геофизический	гидрогеологический	геоморфологический	гидрогеохимический	
—	Наличие горизонтальной зональности в условиях залегания, распространения и разгрузки подземных вод		—	—	—	—	В предгорных зонах горно-складчатых областей
—	Естественная разгрузка напорных вод в виде постоянно действующих родников	—	—	—	Отрицательные формы рельефа вдоль зоны тектонических нарушений	—	Преимущественно в горно-складчатых областях по зонам краевых и внутрискладчатых нарушений
—	—	—	—	Естественная разгрузка напорных вод в виде постоянно действующих родников	—	—	В европейской части СССР на территории распространения четвертичных оледенений

В отличие от критериев, поисковые гидрогеологические признаки характеризуются конкретными природными или техногенными факторами, косвенно указывающими на наличие крупных месторождений подземных вод на площади поисков.

В некоторых гидрогеологических регионах может выявиться совокупность гидрогеологических критериев и признаков, что облегчает выполнение прогнозной оценки площади распространения промышленных месторождений подземных вод. Значение их в различных природных условиях далеко неравноценно. В табл. 8 приведены перечень и краткая характеристика основных и вспомогательных поисковых критериев и признаков. Данные этой таблицы могут быть использованы для постановки поисково-разведочных работ.

ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ

Рассмотрим кратко поисковые критерии и признаки применительно к ранее выделенным месторождениям подземных вод.

Геоморфологический критерий имеет очень важное значение при поисках промышленных месторождений грунтовых вод, подземных вод, приуроченных к песчано-галечным аллювиальным образованиям речных долин, и напорных вод конусов выноса.

Для месторождений грунтовых вод характерным геоморфологическим критерием является морфология речной долины. Анализ элементов долины позволяет правильно оценить условия образования водоносных песчано-галечниковых аллювиальных отложений. Для древних и погребенных долин такие критерии проявляются менее четко и обычно они оцениваются в совокупности с геофизическими данными.

Можно без преувеличения сказать, что геоморфологические критерии лежат в основе поисков всех подтипов промышленных месторождений грунтовых вод. Глубокое понимание природных условий этих месторождений во многом зависит от расшифровки истории геоморфологического развития района в целом, истории формирования песчано-галечниковых коллекторов — своеобразного «рудного тела», в толще которого происходит накопление естественных ресурсов подземных вод.

Как показывают геоморфологические исследования, на формирование песчано-галечных отложений в речных долинах горно-складчатых областей существенно влияли новейшие вертикальные тектонические движения с большой амплитудой. В средней и нижней частях речных долин при выходе их из гор в прилегающую депрессию отмечается накопление толщи водовмещающих рыхлых образований, мощность которых нередко достигает 300 м и более. Для речных долин платформенных областей таких условий для образования галечниковых отложе-

ний обычно не наблюдается, и поэтому мощных толщ песчано-галечных образований здесь не встречается.

Своеобразные геоморфологические критерии отмечаются для месторождений напорных вод конусов выноса предгорных шлейфов. Обычно площадь распространения песчано-галечных образований конусов выноса четко выражена в рельефе — это выпуклая поверхность, веерообразно расходящаяся от гор в сторону окружающей депрессии. Часто топографическая карта с горизонталями поверхности хорошо отражает эти особенности рельефа конусов выноса.

Использование геоморфологического критерия в совокупности с аэрофотосъемкой и гидрогеологическими поисковыми признаками нередко дает возможность выявить площадь распространения артезианского бассейна конуса выноса.

Литологический критерий имеет существенное значение для оценки возможности обнаружения на площади исследований промышленного типа месторождений трещинно-карстовых вод в карбонатных породах, поэтому распространение на площади поисковых работ карбонатных пород, которые могут быть отмечены на геологической карте, является надежным критерием, позволяющим предположить наличие месторождений трещинно-карстовых вод.

Нередко на площади развития карбонатных пород могут формироваться аналоги «слепых рудных тел» — трещинно-карстовые воды, не имеющие естественных выходов на поверхность в виде родников. В таких условиях подземные воды имеют скрытый подземный сток в сторону погружения водовмещающих карбонатных пород, поэтому при гидрогеологической оценке площади распространения карбонатных пород не всегда следует ориентироваться только на поисковых гидрогеологический признак — выход родников.

Для выявления на площади поисково-съемочных работ закрытых артезианских бассейнов горно-складчатого типа большое значение имеют геолого-структурный и стратиграфический поисковые критерии. Геолого-структурный критерий определяет условия образования окладчатых форм, благоприятных для формирования в пластах-коллекторах водоносных горизонтов.

К таким благоприятным складчатым формам следует отнести синклинальные складки и моноклинальные структуры, в разрезе которых принимают участие рыхло-обломочные или карбонатные породы с высокими коллекторскими свойствами.

По этому геолого-структурному признаку была произведена прогнозная оценка распространения закрытых артезианских бассейнов в мелких складчатых структурах в пределах горно-степного района юго-западных Кызылкумов, в Западно- и Южно-Казахстанской областях и др. На площади юго-западных Кызылкумов между палеозойскими выступами мезокайнозойские отложения смяты в синклинальные складки. В мощной

толще песков и песчаников верхнего мела здесь формируются водоносные горизонты напорных вод, с которыми связаны сравнительно крупные месторождения, Результаты прогнозной оценки распространения артезианских бассейнов по геолого-структурному поисковому критерию, выполненной после геологического картирования, впоследствии были полностью подтверждены буровой разведкой. В настоящее время на площади юго-западных Кызылкумов выявлено более .19 артезианских бассейнов со значительными эксплуатационными ресурсами подземных вод. На базе этих ресурсов широко развивается животноводство и оазисное орошение.

В пределах южной части Казахстана по контуру обрамления палеозойского хребта Каратау мезокайнозойские отложения образуют моноклинальную складку, погружающуюся в сторону окружающей депрессии. Геолого-структурные условия залегания третичных и меловых отложений благоприятны для формирования крупных бассейнов горно-складчатого типа, аналогичных артезианским бассейнам юго-западных Кызылкумов. Крупные запасы Каратаусских артезианских бассейнов разведаны и используются для водоснабжения и орошения.

В ходе поисково-съемочных исследований большое значение приобретает стратиграфический поисковый критерий. В процессе гидрогеологических работ в СССР была отмечена приуроченность некоторых очень мощных водоносных горизонтов к определенным стратиграфическим горизонтам, имеющим широкое региональное распространение.

Например, для многих районов Средней Азии и Казахстана с песками и слабо сцементированными песчаниками позднемелового возраста связано формирование мощного горизонта преимущественно пресных напорных вод. При этом напорные горизонты прослеживаются на больших площадях. Такая четкая стратиграфическая приуроченность водовмещающих горных пород к геолого-структурным объектам является надежным критерием для выявления артезианских бассейнов и крупных промышленных месторождений подземных вод на площади распространения верхнемеловых отложений.

Использование этих критериев при геологическом картировании позволило установить площадь распространения Приташкентского артезианского бассейна. Буровая разведка впоследствии полностью подтвердила этот прогноз.

Аналогичные связи геологических структур с водоносными пластами были выявлены на площади Московского артезианского бассейна, где в породах верхнего и среднего карбона широко распространены напорные пресные воды. Пользуясь стратиграфическими признаками того или иного водоносного горизонта, на площади этого бассейна за последние годы удалось открыть и разведать несколько крупных месторождений напорных вод в отложениях верхнего карбона для целей централизованного водоснабжения целой группы крупных объектов.

В процессе поисково-съемочных работ могут быть использованы тектонические поисковые критерии, выражающиеся в оценке гидрогеологических условий зон крупных тектонических нарушений, с которыми часто связано формирование месторождений трещинно-жильных вод.

При поисках месторождений трещинно-жильных вод промышленного типа большое значение имеет учет литологического критерия. Дело в том, что наиболее благоприятная в гидрогеологическом отношении физическая среда (зона брекчирования пород, дробления или усиленной их трещиноватости мощностью до 300 м) образуется преимущественно в изверженных и карбонатных породах или на контакте карбонатных пород с другими литологическими разностями. В таких условиях можно ожидать формирования месторождения трещинно-жильных вод промышленного типа. В других литологических разностях пород (глинистые сланцы, кварциты, тонкослоистые песчаники и др.) тектонические нарушения обычно не сопровождаются образованием мощных зон брекчирования, дробления или усиленной трещиноватости, поэтому на площади таких тектонических нарушений формируются месторождения трещинно-жильных вод с весьма ограниченными ресурсами.

Для выявления месторождений трещинно-жильных вод геолого-структурный критерий целесообразно применять в совокупности с литологическим критерием и гидрогеологическими поисковыми признаками. Очень часто выход на поверхность трещинно-жильных вод в виде родников фиксирует наличие линейно-вытянутых по простиранию зон тектонических нарушений. Такие зоны в некоторых случаях могут быть обнаружены с помощью чисто гидрогеологических признаков.

Поскольку поисковые критерии представляют собой такие природные факторы, которые прямо или косвенно указывают на возможность обнаружения в данных условиях промышленных месторождений подземных вод, к поисковым критериям можно отнести и некоторые геофизические аномалии. Например, при поисковых исследованиях на месторождениях трещинно-карстовых вод такие аномалии могут локализоваться в зонах усиленной закарстованности карбонатных пород, с которыми обычно связана более высокая степень водообильности.

При поисках месторождений грунтовых вод аллювиальных отложений геофизическими методами можно обнаружить погребенные долины. В таких условиях геофизические аномалии можно рассматривать как поисковые критерии. Геофизические аномалии, обнаруженные на поисковой площади, требуют тщательной геологической и гидрогеологической интерпретации, которая во всех случаях производится при совместном участии геофизика и гидрогеолога. Геофизические аномалии в дальнейшем служат хорошей основой для размещения поисково-разведочных скважин.

ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ

При поисковых исследованиях не всегда можно провести строгие границы между поисковыми критериями и признаками, поэтому в процессе поисково-разведочных работ целесообразно применять их совместно, комплексно.

Наиболее ценным из поисковых гидрогеологических признаков является выход родников. Родники в гидрогеологическом отношении следует рассматривать как естественное обнажение какой-то части «рудного тела», характеризующее промышленное месторождение подземных вод. Именно с этих позиций и следует подходить к оценке выхода родников.

Опыт поисковых исследований и разведки показывает, что есть ряд наиболее специфических гидрогеологических особенностей, которые могут характеризовать непосредственную связь родников с промышленными типами месторождений подземных вод:

1. Родники, связанные с месторождениями промышленного типа, очень часто имеют более высокие дебиты по сравнению с другими родниками, распространенными на площади поисков. Например, дебиты отдельных родников могут быть 10—50 л/с, а в некоторых случаях до 500 и даже 3000 л/с, в то время как на площади, где отсутствуют промышленные месторождения, родники имеют дебиты менее 1 л/с. На площади некоторых промышленных месторождений суммарный дебит группы родников на участке естественной разгрузки может достигать очень больших значений. Например, в периферийной части крупных конусов выноса суммарный дебит родников Карасу иногда достигает 8 (реже 14) $м^3/с$. В Араратском артезианском бассейне фиксируется выход родников с суммарным дебитом 18—20 $м^3/с$ (Айгарлыкская группа родников). На площади бассейнов трещинно-карстовых вод естественная разгрузка тоже может быть большой: до 500 л/с для отдельных родников и до 3 $м^3/с$ для группы родников. На некоторых месторождениях напорных вод выход родников может иметь восходящий характер.

Таким образом, наличие крупных родников всегда является характерным гидрогеологическим признаком, указывающим на существование на исследуемой площади месторождений подземных вод промышленного типа.

2 Геолого-геоморфологические условия естественной разгрузки подземных вод также имеют свои особенности для различных типов месторождений. Например, для артезианских бассейнов конусов выноса выход родников носит площадной характер: группа крупных родников обычно формируется в периферийной части конусов выноса в зоне близкого залегания подземных вод.

В бассейнах трещинно-карстовых вод родники очень часто формируются непосредственно в речных долинах, в том числе на площади современной поймы реки. Для месторождений тре-

щинно-жильных вод выход родников в плане обычно формируется в виде линейной цепочки, вытянутой вдоль зоны тектонического нарушения.

3. Учет режима дебита родников имеет большое значение при проведении прогнозной оценки поисковой площади. Родниковая сеть, связанная с промышленными типами месторождений подземных вод, очень часто отличается относительно устойчивым во времени режимом дебитов, хотя в некоторых случаях, особенно для месторождений трещинно-карстовых вод, дебит родников может подвергаться резким колебаниям по сезонам года.

4. Температурный режим родниковых вод для некоторых типов месторождений характеризуется некоторым постоянством и отражает глубину циркуляции подземных вод.

Не менее важным для прогнозной оценки является искусственный гидрогеологический поисковый признак — данные буровых скважин, пройденных ранее на площади поисков, или гидрогеологические данные по обводненности действующих шахт, карьеров, водозаборов и т. д. Большую роль при этом играют дебиты фонтанирующих скважин, которые могут явиться надежными индикаторами для выявления напорных горизонтов. Устойчивый режим и большие дебиты фонтанирующих скважин могут указывать на обеспеченность напорных вод естественными ресурсами.

Исключительно ценные данные для оценки поисковой площади можно получить на действующих водозаборах или родниках, поэтому в процессе поисковых работ следует тщательно собирать гидрогеологические материалы по всем ранее пробуренным скважинам и концентрированным водозаборам с тем, чтобы использовать гидрогеологические данные по опыту эксплуатации для прогнозной оценки всей площади поисков.

Очень часто при поисковых исследованиях большое значение приобретают гидрогеохимические поисковые признаки, отражающие условия формирования подземных вод различного химического состава и минерализации. Сложные гидрогеохимические условия на площади поисков требуют проведения специальных исследований для изучения и оконтуривания зон распространения пресных вод и вод повышенной минерализации.

Существенное значение в прогнозной оценке промышленных типов месторождений подземных вод имеет гидрологический поисковый признак. Речную сеть для подземных вод, распространенных на площади поисков, можно рассматривать как естественные дрены.

Наличие на площади поисков, особенно на площади возможного обнаружения промышленного месторождения, речной сети с постоянно действующими водотоками и активная форма гидравлической связи подземных вод с поверхностными позволяют предположить, что на площади поисков могут быть выявлены участки, в контурах которых возможно строительство

водозаборов инфильтрационного типа, т. е. водозаборов, расположенных непосредственно в области питания подземных вод. Таким образом, изучение поверхностных вод может иметь исключительно большое значение в промышленной оценке месторождений подземных вод.

При этом важно отметить не просто наличие гидрографической сети на площади поисков, а в предварительном виде выяснить режим поверхностного стока: постоянно или временно действует поверхностный поток, как изменяется поверхностный сток рек по сезонам года и т. д.

Отсутствие на площади поисков гидрографической сети может резко снизить ценность оконтуренных промышленных месторождений подземных вод. Исключение представляют некоторые месторождения напорных вод, имеющие область питания в сопряженных зонах (например, интенсивное питание со стороны горных массивов для месторождений на площади межгорных артезианских бассейнов).

К поисковым гидрогеологическим признакам можно также отнести так называемый признак природных аналогов. Гидрогеолог-поисковик и разведчик перед проведением поисковых исследований должен собрать все гидрогеологические данные по опыту разведки и эксплуатации подземных вод в аналогичных геолого-гидрогеологических условиях. Пользуясь данными опытной эксплуатации, методом природной аналогии можно правильно выполнить прогнозную оценку вновь выявленных месторождений подземных вод на поисковой площади.

Использование в совокупности поисковых критериев и признаков способствует более целеустремленному ведению поисковых работ, направленных на обнаружение месторождений подземных вод промышленного типа.

Из приведенных в табл. 8 данных видно, что каждое промышленное месторождение подземных вод имеет характерные признаки и критерии, которые в сочетании с другими природными факторами (мощность и условия распространения водоносного горизонта, фильтрационные свойства пород и др.) помогают выявить основные закономерности пространственного размещения и формирования на поисковой площади того или иного типа месторождений.

Главным поисковым признаком для всех рассмотренных типов промышленных месторождений является гидрологический. Именно постоянно действующие поверхностные водотоки (речная сеть) на площади месторождений определяют возможности создания на отдельных участках в области питания водозаборов инфильтрационного типа, позволяющих интенсифицировать отбор подземных вод на неограниченный срок эксплуатации и обеспечивающих постоянное питание за счет береговой и донной инфильтрации поверхностных вод.

Выше упоминался принцип комплексного изучения площади

поисковых исследований, в соответствии с которым должна быть дана прогнозная оценка распространения месторождений промышленных, термальных и минеральных подземных вод. К сожалению, поисковые признаки и поисковые критерии на эти типы подземных вод разработаны в настоящее время очень слабо.

Глава 9

МЕТОДИКА РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В разведке месторождений пресных подземных вод обычно выделяют три стадии: а) предварительная, б) детальная, в) эксплуатационная разведка.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

В общей технологической схеме проведения поисково-разведочных работ особое место занимает стадия предварительной разведки месторождений подземных вод. Объясняется это сложностью задач, стоящих перед исследователями на этой стадии: а) изучение основных особенностей геологического строения и гидрогеологических условий перспективных участков, выдвинутых под разведку в результате детальных поисков; б) качественная и количественная оценка источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод участка предварительной разведки; в) уточнение гидрогеологических параметров пород на площади разведочного участка, обоснование расчетной схемы и выбор метода оценки разведанных запасов; г) обоснование для данных гидрогеологических и технико-экономических условий наиболее рациональной схемы будущего водозаборного сооружения; д) прогнозная оценка (в предварительном виде) степени влияния планируемого отбора подземных вод на состояние геологической среды и окружающей среды в целом; е) выяснение общей величины эксплуатационных запасов подземных вод на площади разведочного участка.

На стадии предварительной разведки должны быть определены общие масштабы месторождения, возможность удовлетворения заявленной потребности в воде, а также (в предварительном виде) условия промышленной его отработки.

В процессе изучения месторождения на стадии предварительной разведки рекомендуется выполнить следующие основные виды гидрогеологических работ.

1. *Детальная гидрогеологическая съемка* участка предварительной разведки (площадь, на которой впоследствии разместится водозаборное сооружение). Масштаб съемки от 1 : 5000 до 1 : 25 000 в зависимости от площади и степени сложности месторождения. Детальные съемки в таких масштабах целесооб-

разно проводить инструментальным путем на готовой топографической основе. Информативной основой для проведения съемки являются результаты комплекса гидрогеологических исследований, которые проводятся на участке предварительной разведки. Исходя из этого, детальную съемку целесообразно выполнять в два этапа.

В самом начале исследований необходимо провести детальные рекогносцировочные обследования всей площади перспективного участка с целью уточнения границ топографической съемки, предварительного изучения геоморфологических, геологических и гидрогеологических его особенностей, а также выявления технико-экономических условий проведения различных видов разведочных работ (выяснение степени проходимости застроенности территории, наличия подземных и наземных коммуникаций и т. д.).

Второй этап охватывает период работ на стадии предварительной разведки, когда выполняется весь комплекс исследований с соответствующим отображением на карте результатов всех видов исследований, геофизических, буровых и опытно-фильтрационных работ, изучения режима подземных вод и т. д.

Таким образом, площадь детальной съемки (предварительной разведки) может быть обеспечена информацией, достаточной для составления различных специализированных гидрогеологических карт и разрезов, отражающих особенности геологического строения, геоморфологических и гидрогеологических условий (карты глубин залегания, фильтрационных свойств продуктивного водоносного горизонта, минерализации подземных вод, гидроизогипс и др.).

2. *Детальные наземные геофизические исследования* на участках предварительной разведки проводятся с целью уточнения геолого-гидрогеологических условий и плана размещения буровых работ.

3. *Бурение гидрогеологических скважин* на площади предварительной разведки включает проходку разведочных и наблюдательных скважин. При сложных гидрогеохимических условиях, когда необходимо изучить условия взаимосвязи пресных и минерализованных подземных вод, могут быть пробурены структурно-картировочные скважины. Методика размещения буровых гидрогеологических скважин на площади предварительной разведки (число разведочных и наблюдательных скважин, их глубина, расстояние между скважинами) определяется рядом факторов, главными из которых являются: 1) конкретные гидрогеологические условия разведочного участка, в том числе степень их сложности; 2) схема будущего водозаборного сооружения; 3) требующееся количество воды; 4) требования действующей инструкции ГКЗ СССР к изученности месторождений подземных вод и т. д.

В принципе для многих случаев можно рекомендовать следующую систему первоочередного размещения разведочных

скважин: 1) на перспективном участке необходимо произвести сгущение скважин в створах ранее пройденных поисковых профилей или поперечников с таким расчетом, чтобы были охвачены фланги и центральная часть площади разведочного участка; 2) в случае необходимости на разведочном участке могут быть заложены дополнительные разведочные скважины для более полного освещения гидрогеологических условий. Дальнейшее размещение разведочных скважин на участке исследований должно обосновываться в зависимости от результатов бурения скважин первой очереди.

Глубина заложения разведочных скважин во многих случаях определяется расположением и мощностью выбранного продуктивного водоносного горизонта. В сложных гидрогеохимических условиях допустимо бурение специальных разведочно-структурных скважин с целью изучения залегающих ниже подземных вод повышенной минерализации.

В водоносных горизонтах большой мощности (более 80 м) на первых этапах исследований целесообразно изучить изменение в вертикальном разрезе фильтрационных свойств водовмещающих пород. По результатам таких исследований можно выделить наиболее продуктивную часть водоносного горизонта и установить оптимальную глубину разведочных скважин, которые смогут обеспечить наиболее эффективную работу будущего водозаборного сооружения. В решении этой задачи кроме опытно-фильтрационных работ существенную роль могут сыграть детальные каротажные геофизические исследования (резистивиметровый и расходометрический каротаж и др.). На месторождениях, отличающихся весьма неоднородными фильтрационными свойствами водовмещающих пород (месторождения трещинно-карстовых вод и зон тектонических нарушений), рекомендуется на участках разведки предварительно проходить опережающие поисково-картировочные скважины небольшого диаметра. Последующее бурение собственно разведочных скважин на водозаборном участке осуществляется в зависимости от результатов бурения опережающих поисково-картировочных скважин.

4. *Опытно-фильтрационные работы* (одиночные и кустовые откачки из разведочных скважин) наиболее важны для оценки эксплуатационных запасов подземных вод разведочного участка. Главное назначение комплекса таких работ состоит в определении основных гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта и, в случае необходимости, разделяющих слоев; изучении граничных условий продуктивного водоносного горизонта в плане и разрезе; выяснении качества подземных вод с помощью химического и санитарно-бактериологического опробования. Для решения перечисленных задач на разведочном участке на стадии предварительного его изучения обычно проводятся следующие опытно-фильтрационные работы: опытные зональные откачки из одиночных скважин

в процессе их проходки (с целью исследования изменений фильтрационных свойств водовмещающих пород в вертикальном разрезе); опытные откачки из одиночных скважин после окончания их бурения; опытно-кустовые откачки из разведочных скважин с кустом наблюдательных выработок (для уточнения гидрогеологических параметров пласта и их изменений по площади).

Степень достоверности разведанных запасов подземных вод на месторождении прямо связана со степенью достоверности определения основных гидрогеологических параметров пласта, поэтому опытно-фильтрационные работы при разведке месторождений подземных вод необходимо проводить качественно и на высоком научно-методическом уровне.

5. *Опробование подземных вод.* Особое место в общем комплексе работ, проводимых на стадии предварительной оценки, занимает изучение качества подземных вод и санитарного состояния площади разведочного участка путем отбора проб воды из разведочных и наблюдательных скважин с последующим исследованием их в лабораторных условиях. Пробы воды целесообразно отбирать не только из продуктивного горизонта, но из смежных с ним водоносных горизонтов, а также поверхностных водотоков и водоемов. Частота отбора проб воды и их число определяются прежде всего сложностью гидрогеохимических условий разведочного участка и поэтому в каждом конкретном случае устанавливаются отдельно. Санитарное обследование для гидрогеологического обоснования зон санитарной охраны на разведочном участке целесообразно выполнять совместно с представителями органов санитарного надзора в соответствии с действующими в этих органах инструкциями. При обнаружении загрязнений в подземных водах допускается бурение дополнительных скважин в районе месторождения. Отбор, хранение, транспортировку проб воды и проведение анализов необходимо осуществлять в соответствии с ГОСТ 2874-82.

6. *Изучение режима подземных и поверхностных вод.* Изучение естественного режима подземных и поверхностных вод очень важно для достоверной оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Особое значение такое изучение приобретает при разведке месторождений подземных вод речных долин и трещинно-карстовых вод карбонатных пород, режим которых тесно связан с воздействием окружающей среды (метеорологические и гидрологические факторы). По своему содержанию и направленности эти исследования являются продолжением работ, которые были начаты в стадию детальных поисков.

Изучение естественного режима подземных и поверхностных вод на разведочном участке необходимо проводить на специально оборудованной для этой цели опорной наблюдательной сети (буровые наблюдательные скважины, водомерные посты, организованные в речных долинах и в местах естественной разгрузки подземных вод в виде родников). Размещение опорной

режимной наблюдательной сети определяется необходимостью решения целого комплекса задач, основными из которых являются следующие: выяснение величины годового колебания уровня подземных вод; определение минимальной, средней и максимальной мощности продуктивного водоносного горизонта и связанных с ними значений допустимого понижения уровня в будущих водозаборных скважинах на разведочном участке, а также внесение поправок в ходе снижения уровня при опытно-фильтрационных работах; уточнение условий взаимосвязи подземных вод с поверхностными, а также с подземными водами, приуроченными к смежным водоносным горизонтам; установление (в некоторых случаях уточнение) гидрогеологических параметров пород и др.

Продолжительность наблюдений за естественным режимом подземных вод для грунтовых и неглубоко залегающих напорных вод должна быть не менее года, поэтому исследования следует начинать на стадии детальных поисков. Частота замеров уровней, температуры и расхода определяется в каждом конкретном случае в зависимости от закономерностей изменения элементов режима и характера решаемой задачи.

Особое значение исследования по режиму приобретают на тех месторождениях, где подземные воды находятся в тесной гидравлической связи с поверхностными водами, когда последние при эксплуатации могут явиться основным источником формирования эксплуатационных запасов. В таких гидрогеологических условиях на месторождении необходимо провести цикл балансово-гидрометрических работ с целью изучения поверхностного стока реки и его изменения по сезонам года и в многолетнем разрезе. Чаще всего полевые работы должны сочетаться со сбором и обобщением материалов многолетних гидрологических исследований. В указанном направлении должны быть изучены: уровенный режим водотока, режим поверхностного стока, температура, химический и бактериологический состав поверхностных вод, режим твердого стока (в том числе мутность), условия промерзания поверхностных вод и прохождения весеннего паводка (в том числе границы затопления пойменной террасы), продолжительность маловодного периода и его количественная характеристика. Исследованиями должны быть установлены максимальные и минимальные значения уровенного режима поверхностного стока соответственно 1, 5 и 95 %-ной обеспеченности. Особенно важно изучить минимальный средний за 30-суточный период расход реки гидрологического года 95 %-ной обеспеченности.

При разведке водозаборных участков, на которых дебит каптажного сооружения формируется за счет периодической сработки естественных запасов подземных вод с последующим восполнением в период прохождения паводка, необходимо получить количественную характеристику стока в маловодный период и установить продолжительность этого периода. В таких усло-

виях необходимо гидрометрическими исследованиями установить внутригодовое распределение поверхностного стока в течение гидрологического года (95 и 50 %-ной обеспеченности) и ряда лет.

Общая продолжительность балансово-гидрологических исследований на месторождениях должна быть по возможности максимальной, на некоторых месторождениях их целесообразно начинать на стадии детальных поисков и продолжать до окончания разведки.

При изучении на стадии предварительной разведки некоторых объектов, например месторождений малых замкнутых бассейнов трещинно-карстовых вод, линз пресных подземных вод и др., важно установить величину ежегодного питания (разгрузки) водоносного горизонта. Для этого на опытных участках должны быть проведены специальные балансовые исследования (снегомерная съемка, наблюдения в лизиметрах, более частые микронаблюдения за режимом уровня и др.). Продолжительность таких исследований должна составлять не менее одного года.

В процессе проведения гидрогеологических работ на стадии предварительной разведки исключительно важное значение приобретают специальные исследования по изучению опыта эксплуатации подземных вод на водозаборных сооружениях, расположенных в районе изучаемого месторождения. В тех случаях, когда на действующих каптажных сооружениях проводятся стационарные режимные наблюдения, необходимо собрать и обобщить материалы этих наблюдений и совместно с постами гидрогеологической службы провести контрольные замеры дебита и уровней подземных вод, а также оценить влияние этих сооружений на состояние окружающей среды.

6. *Камеральная обработка материалов* является завершающим этапом предварительной разведки месторождений подземных вод. В состав камеральных работ входят: а) обобщение и анализ собранных материалов комплексных исследований; б) подсчет разведанных запасов подземных вод и их категоризация; в) предварительная прогнозная оценка изменений окружающей среды, которые могут возникнуть при будущей длительной эксплуатации; г) обоснование дальнейшей постановки работ на стадии детальной разведки (составление технико-экономических расчетов по выбору участка водозабора). При изучении месторождений подземных вод с простыми гидрогеологическими условиями и небольшой заявленной потребностью в воде (намного меньше общих эксплуатационных возможностей месторождения) результаты предварительной разведки могут оказаться достаточными для оценки эксплуатационных запасов по категориям В и C_1.

Однако в большинстве случаев, как это следует из требований Инструкции ГКЗ СССР [14], по результатам предварительной разведки определяется общая величина эксплуатационных

запасов подземных вод с оценкой их по категориям C_1 и C_2 (по категории C_1 — в количестве первоочередной заявленной потребности в воде). Кроме того, должен быть выбран участок для проведения детальной разведки, а также рациональная для данных условий схема водозабора.

Выбор рациональной схемы водозаборного сооружения целесообразно выполнять в такой последовательности [11]: а) исходя из конкретных гидрогеологических условий разведочного участка, необходимо наметить несколько вариантов размещения водозаборных скважин по площади, расстояния между скважинами, их число и проектный дебит; б) затем для каждого варианта следует провести предварительные ориентировочные расчеты общей производительности водозабора при заданной допустимой величине понижения уровня (производительность водозабора должна соответствовать общей заявленной потребности в воде объекта водоснабжения); в) далее необходимо выполнить с помощью приближенных экономических расчетов сравнительную оценку наиболее рационального размещения эксплуатационных скважин по выбранной схеме водозаборного сооружения. Приближенные экономические расчеты так же, как и выбор схемы водозабора, должны быть выполнены совместно с заинтересованной проектной организацией.

ДЕТАЛЬНАЯ РАЗВЕДКА

В соответствии с требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14] гидрогеологические работы на стадии детальной разведки месторождений производятся только на тех участках, которые по данным предварительной разведки, признаны наиболее рациональными для промышленного освоения. Главная задача гидрогеологических работ на стадии детальной разведки состоит в обосновании проекта строительства и рациональных условий эксплуатации будущего водозаборного сооружения. Для решения этой задачи на участках будущего водозабора эксплуатационные запасы подземных вод должны быть разведаны с детальностью, обеспечивающей подсчет запасов с учетом заданного количества воды на ближайший период по категориям А, В, C_1. Для удовлетворения на перспективу должны быть выявлены запасы с оценкой их не ниже категории C_1. Кроме этих требований, Инструкция ГКЗ СССР [14] регламентирует необходимость изучения инженерно-геологических условий участка детальной разведки — естественных геодинамических процессов, протекающих в районе месторождений (оползни, обвалы, мерзлотные явления, просадочность грунтов и др.), категорий буримости горных пород, вскрываемых водозаборными скважинами, а также характер их устойчивости в скважинах и др. Необходимость решения перечисленных выше основных задач определяет выбор методики проведения комплекса гидрогеологических работ на стадии детальной разведки месторождения.

1. *Буровые работы.* Один из важнейших методических вопросов, решаемых на стадии детальной разведки, — способ размещения буровых разведочных скважин. Буровые разведочные и разведочно-эксплуатационные скважины следует размещать в основном в пределах водозаборного участка (с учетом ранее пробуренных скважин) в соответствии с выбранной схемой водозаборного сооружения. Конструкции разведочно-эксплуатационных скважин должны обеспечивать возможность их эксплуатации с проектной производительностью. По вопросу о числе скважин, необходимых для разведки участка, на стадии детальных исследований в Инструкции ГКЗ СССР [14] содержится следующее требование: число пробуренных в процессе разведки разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин зависит от степени сложности месторождения и схемы водозабора. Например, при линейной схеме водозабора на месторождениях первой и второй групп сложности в относительно однородных по фильтрационным свойствам водоносных горизонтах число разведочных скважин на участке детальной разведки должно составлять 15—20 % (но не менее двух скважин в схеме водозабора). В неоднородных по фильтрационным свойствам породах на месторождениях второй группы сложности должно быть пробурено 40—50 % скважин от общего числа проектных эксплуатационных выработок (при этом 15—20 % от общего числа эксплуатационных скважин водозабора должно быть опробовано с дебитом, близким к проектному). На месторождениях третьей группы сложности на месте каждой проектной эксплуатационной скважины по выбранной схеме водозабора на стадии детальной разведки должна быть пробурена разведочная или разведочно-эксплуатационная скважина.

При детальной разведке месторождений подземных вод, освоение которых требует применения специальных методов (лучевые водозаборы или искусственное выполнение подземных вод), на участке производится строительство разведочно-эксплуатационного водозабора, для чего наряду с бурением скважин проходят специальные выработки (инфильтрационные опытные бассейны и др.).

Критерием для оценки степени неоднородности фильтрационных свойств водоносных пород может служить предложенная Л. С. Язвиным величина среднего квадратического отклонения логарифма водопроводимости или коэффициента вариации (табл. 9).

Для предварительной оценки степени фильтрационной неоднородности пород продуктивного горизонта могут быть использованы данные по определению удельных дебитов скважин. В Методическом руководстве по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения в этом отношении изложены следующие рекомендации [11]:

1) если буровые скважины на разведочном участке имеют однотипное оборудование, то в условно однородных пластах

максимальные и минимальные удельные дебиты скважин различаются не более чем в пять раз; в неоднородных — в пять—десять раз; в весьма неоднородных — более чем в десять раз. Как показывает практика разведки, водоносные пласты с относительно однородными фильтрационными свойствами сложены чаще всего песками, песчано-галечниковыми и равномерно трещиноватыми породами; пласты с неоднородными свойствами — трещиноватыми и закарстованными карбонатными породами; весьма неоднородными свойствами отличаются брекчированные породы в зонах тектонических нарушений и крайне неравномерно закарстованные массивные карбонатные породы;

Таблица 9. Оценка степени неоднородности фильтрационных свойств пород

Водоносные горизонты	Среднее квадратическое отклонение логарифма водопроводимости	Коэффициенты вариации, %
Условно однородные	<0,2	<40
Неоднородные	0,2—0,4	40—80
Весьма неоднородные	>0,4	>80

2) при необходимости разведочные скважины могут быть пробурены за пределами площади участка детальной разведки с целью: а) изучения гидрогеологических условий примыкающих флангов месторождения и оценки эксплуатационных запасов подземных вод по перспективным категориям C_1 и C_2 для удовлетворения заявленной потребности в воде на перспективу; б) уточнения граничных условий оцениваемой площади и геологического строения.

Приведенные рекомендации по размещению разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин на участке детальной разведки следует рассматривать как общий принцип, к реализации которого нельзя подходить формально.

Конструкции гидрогеологических скважин, выбор способов бурения и необходимые для этих целей технические средства рассмотрены в гл. 11. Здесь необходимо отметить, что все вопросы по технологии проходки гидрогеологических скважин, а также о необходимости отбора керна в процессе бурения, по существу, решаются в каждом конкретном случае в зависимости от степени изученности района месторождения, назначения скважин и геолого-технических условий их проходки.

На стадии детальной разведки месторождения особенное значение имеют правильный выбор технологии вскрытия продуктивного водоносного горизонта и наиболее рациональной

для данных конкретных гидрогеологических условий конструкции фильтров и технологии оборудования разведочных скважин. При решении этих вопросов необходимо очень серьезно отнестись к выбору способа бурения (ударно-канатное, роторное, с обратно-всасывающей промывкой и др.) разведочных скважин, к оценке возможности применения глинистого раствора в процессе их проводки и т. д. После завершения разведки месторождения все скважины, кроме передаваемых для эксплуатации скважин опорной наблюдательной сети, подлежат ликвидации в порядке, установленном горно-техническим надзором.

2. *Опытно-фильтрационные работы* в процессе детальной разведки месторождения проводятся с целью: 1) детального изучения и уточнения гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта; 2) уточнения граничных условий фильтрационного потока; 3) определения опытным путем проектной производительности разведочных скважин; 4) установления величины срезок уровня при взаимодействии скважины; 5) выяснения эмпирических закономерностей изменения уровня подземных вод при заданном водоотборе; 6) изучения опытным путем возможного изменения качества подземных вод в сложных гидрогеохимических условиях.

Для решения перечисленных задач обычно проводятся пробные и опытные откачки из одиночных разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин, опытные откачки из разведочных скважин с кустами наблюдательных выработок, опытно-эксплуатационные откачки из одиночной или группы разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин с сетью наблюдательных выработок. Методика проведения опытно-фильтрационных работ и обработки их данных изложена в гл. 12.

3. *Геофизические каротажные методы* исследования гидрогеологических скважин являются неотъемлемой частью комплекса поисково-разведочных работ на стадии детальной разведки. С помощью таких исследований (электро-, радиоактивный, резистивиметрический и расходометрический каротаж и т. д.) на разведочном участке могут быть решены следующие важные геологические, гидрогеологические и технологические задачи: уточнение (а в некоторых случаях изучение) литологического состава горных пород, вскрытых разведочными и наблюдательными скважинами; изучение фильтрационных свойств рыхлых пород продуктивного горизонта и их изменения в вертикальном разрезе; выделение в разрезе водоносных трещиноватых и закарстованных пород в зонах повышенной проницаемости; определение естественной скорости потока подземных вод; диагностика технического состояния разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин и др.

Решение первых трех из перечисленных задач имеет очень большое значение для повышения эффективности разведочных работ. Проведение каротажных работ на участках с хорошей

изученностью позволяет применить скоростную проходку гидрогеологических скважин без отбора керна, не снижая при этом достоверности геолого-гидрогеологической информации буровых работ.

Для повышения достоверности данных о разведанных запасах подземных вод на стадии детальной разведки должны быть продолжены работы по изучению режима поверхностных и подземных вод, характера и качества подземных вод, а также дополнительные исследования по охране окружающей среды и защите подземных вод от загрязнений.

Завершаются работы на стадии детальной разведки камеральной обработкой материалов, составлением отчета с подсчетом запасов и представлением запасов на утверждение в ГКЗ СССР. В соответствии с требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14] в отчет о результатах разведки должны входить следующие разделы: 1) общие сведения о районе работ и месторождений (участка), в которых должна быть представлена характеристика основных природных факторов, определяющих общие гидрогеологические условия (геофизические, климатические, орографические и др.); 2) краткая характеристика геолого-гидрогеологических условий района месторождения; 3) характеристика условий водоснабжения и анализ режима эксплуатации действующих водозаборов; 4) состав, объем и методика всего комплекса выполненных разведочных гидрогеологических работ с характеристикой их качества; 5) геолого-гидрогеологические условия и степень их сложности непосредственно для месторождения и для участков детальной разведки; 6) характеристика качества подземных и поверхностных вод, а также санитарного состояния участка детальной разведки с гидрогеологическим обоснованием организации зон санитарной охраны и защиты подземных вод от загрязнений; 7) основные результаты геофизических, опытно-фильтрационных, балансово-гидрометрических и гидрологических работ, изучения режима подземных вод; 8) расчетные гидрогеологические параметры продуктивного водоносного горизонта и обоснование исходных данных для подсчета запасов (методика и результаты определений, средние значения); 9) оценка естественных ресурсов и запасов, эксплуатационных запасов (в том числе с учетом их искусственного восполнения), метод подсчета, расчетная схема, результаты оценки, категоризация разведанных запасов, оценка обеспеченности эксплуатационных запасов и др.; 10) рекомендации по проектированию и эксплуатации будущего водозаборного сооружения, характеристика подготовленности к промышленному освоению месторождения; 11) экономический анализ результатов разведочных работ (оценка экономической эффективности разведки, в том числе стоимости единицы разведанных запасов подземных вод); 12) выводы и заключение (рекомендации по направлению дальнейших исследований и повышению эффективности разведочных гидрогеологических работ).

Текст отчета, как правило, сопровождается графическими приложениями: 1) различными геологическими, гидрогеологическими картами и разрезами, а также другими специализированными картами по району и непосредственно по участку детальной разведки; 2) графиками режимных наблюдений за подземными и поверхностными водами, опытно-фильтрационных работ (в том числе листы откачек), результатов качественного опробования (химических анализов) и др.; 3) картой фактического материала предыдущих и выполненных при разведке данного месторождения исследований; 4) расчетной схемой, отражающей преобразование природных условий непосредственно месторождения; 5) планом подсчета эксплуатационных запасов с контурами расчетных блоков и указанием запасов по категориям; 6) при оценке запасов методом моделирования расчетной схемой модели, картой фильтрационных параметров с сеткой сопротивлений и емкостей электрической модели, а также картами и графиками задания граничных условий и др.

Перечисленные разделы входят в состав всех отчетов, которые представляются с подсчетом разведанных запасов в ГКЗ СССР на утверждение.

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ РАЗВЕДКА

Детальной разведкой не завершается научно-производственный процесс изучения месторождений подземных вод. Теория и практика показывают, что на месторождениях целесообразно продолжить детальные исследования на стадии промышленного освоения. С этой целью в процессе эксплуатации подземных вод на действующих водозаборных сооружениях обычно выполняется эксплуатационная разведка. Основными задачами ее являются: 1) стационарный надзор за режимом эксплуатации подземных вод на водозаборном участке (дебит водозаборных скважин и величина допустимого понижения уровня подземных вод); 2) изучение условий формирования депрессионной воронки подземных вод на площади влияния водозаборного сооружения; 3) исследование характера изменения качества подземных вод в годовом и многолетнем разрезе; 4) уточнение гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта; 5) периодическая переоценка эксплуатационных запасов подземных вод (в том числе перевод запасов из низшей категории в более высокую) с целью обоснования оптимального режима водоотбора и возможного расширения водозабора; 5) изучение техногенных процессов, которые могут оказать негативное воздействие на геологическую и окружающую среду, с целью обоснования защитных мероприятий; 6) диагностика эксплуатационных скважин для определения их технического состояния, в том числе состояния фильтров водозаборных скважин; 7) доразведка флангов месторождения с целью приращения эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном участке

(для удовлетворения перспективной потребности в воде); 8) выявление возможности искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод как эффективного средства защиты подземных вод от истощения, улучшения их качества, а также для решения вопроса о повышении общей производительности каптажного сооружения; 9) проведение сравнительной оценки гидрогеологических данных разведки и результатов эксплуатации с целью анализа информации и использования ее для дальнейшего совершенствования методики разведки месторождений подземных вод, находящихся в аналогичных условиях. Для решения этих задач на стадии эксплуатационной разведки на водозаборном участке целесообразно проводить следующий комплекс гидрогеологических и инженерно-геологических работ.

1. *Стационарные наблюдения за режимом эксплуатации подземных вод.* В состав таких наблюдений входят: а) изучение дебита каждой водозаборной скважины, а также суммарной производительности всего водозаборного сооружения в целом; б) исследование режима уровня подземных вод по всем наблюдательным скважинам опорной и вспомогательной сети для контроля за понижением уровня и определения условий формирования депрессионной воронки; в) изучение температурного режима подземных вод по скважинам опорной сети; г) выяснение химического и бактериологического состава подземных вод и их изменения для определения изменчивости качества подземных вод.

На тех водозаборных участках, где эксплуатационные дебиты скважин формируются в результате береговой инфильтрации поверхностных вод (привлекаемых ресурсов), должны быть организованы стационарные наблюдения за режимом поверхностных вод для изучения: а) уровенного режима и расхода поверхностных вод непосредственно по площади водозаборного участка (если отсутствует опорный створ системы Гидрометслужбы СССР); б) химического и бактериологического состава поверхностных вод.

Для того чтобы провести комплекс стационарных исследований в процессе эксплуатации подземных вод в период строительства водозаборного сооружения следует оборудовать специальную наблюдательную сеть, состоящую из опорной, постоянно действующей сети скважин, и дополнительной вспомогательной сети скважин, необходимость в которой может возникнуть при более детальном изучении гидрогеологических условий эксплуатации подземных вод. При проектировании скважин опорной и вспомогательной сетей на водозаборном участке необходимо учитывать некоторые факторы, оказывающие влияние на размещение буровых скважин для стационарной наблюдательной сети. Основными из них являются назначение режимных наблюдений (содержание конкретных задач, перечисленных выше), тип и степень гидрогеологической сложности месторождения подземных вод, граничные условия (в плане и

разрезе) фильтрационного потока подземных вод, формирующегося на водозаборном участке в естественных и нарушенных условиях.

Необходимо отметить, что наблюдательные скважины опорной сети должны располагаться не только в центральной части водозаборного сооружения, где наиболее интенсивно протекают гидрогеологические процессы, но и на всей площади развития депрессионной воронки, где можно несколько разрядить густоту расположения пьезометрических выработок. В сложных гидрогеохимических условиях, когда возможно взаимодействие между водоносными горизонтами (при многослойном разрезе) и необходимо учитывать граничные условия потока в разрезе, наблюдательные скважины опорной сети следует располагать не только в продуктивном водоносном горизонте, но и в смежных с ним водоносных горизонтах, а, если это потребуется, то и в слабопроницаемых разделяющих слоях, где целесообразно устанавливать датчики порового давления (см. гл. 18).

Для повышения эффективности стационарного изучения режима подземных вод целесообразно в центральной части водозаборного участка все наблюдения за режимом уровня и дебитом скважин проводить с помощью системы автоматической регистрации первичной гидрогеологической информации. Согласно указаниям Инструкции ГКЗ СССР [14], в комплекс изучения режима эксплуатации каптажного сооружения должны также входить сбор и обобщение гидрогеологических данных о работе водозабора за весь предыдущий период (изменения конструкций и числа водозаборных скважин, общей величины водоотбора, дебита, уровня подземных вод и т. д.).

2. *Инженерно-геологические исследования на участках действующих водозаборов* проводятся с целью изучения естественных геодинамических и техногенных процессов, влияющих на состояние окружающей среды. Опыт показывает, что интенсивная и длительная эксплуатация подземных вод системой групповых водозаборов приводит к развитию техногенных процессов (суффозионно-карстовые, вторичная консолидация осушенных рыхлых пород и др.). Процессы эти могут привести к деформации поверхности и находящихся на ней сооружений, а также подземных коммуникаций.

Вместе с тем в районе действующих водозаборных сооружений, особенно в горно-складчатых областях, могут активизироваться и естественные геодинамические процессы — оползне- и селеобразование и др. В результате развития этих процессов могут быть повреждены каптажные сооружения, что вызовет временные перебои в водоснабжении. Для выявления этих процессов целесообразно периодически проводить рекогносцировочные обследования района водозабора и организовать на водозаборном участке стационарные инженерно-геологические режимные наблюдения. С этой целью на поверхности должна быть оборудована опорная сеть геодезических (маркшейдерских) ре-

перов: в первую очередь в центральной части депрессионной воронки, а затем, по мере развития депрессионной воронки, на ее флангах. Обычно такая сеть оборудуется по двум взаимно перпендикулярным профилям, охватывающим центральную часть водозаборного участка и его фланги. За пределами влияния депрессионной воронки должен быть оборудован так называемый нулевой репер. Такое расположение опорной наблюдательной сети позволяет довольно четко фиксировать на картах границы деформирующегося под влиянием техногенных процессов участка поверхности земли. Наблюдения по опорной сети целесообразно проводить два-три раза в год с помощью высокоточной нивелировки всех наблюдательных пунктов с привязкой их к нулевому реперу.

3. *Бурение гидрогеологических скважин* является неотъемлемой частью исследований, которые проводятся на стадии эксплуатационной разведки месторождений подземных вод. По назначению скважины, пробуренные на водозаборном участке, можно подразделить на: а) наблюдательные, входящие в состав опорной и вспомогательной режимной сети; б) инженерно-геологические, созданные с целью изучения геодинамических процессов; в) разведочно-эксплуатационные, которые обычно располагаются на флангах месторождения (за пределами водозаборного участка) и используются для выяснения возможностей приращения эксплуатационных запасов подземных вод. В случае необходимости производят бурение резервных эксплуатационных скважин.

4. *Геофизические работы* на стадии эксплуатационной разведки выполняются преимущественно для выяснения технического состояния эксплуатационных скважин (в первую очередь проверить работу фильтра), поэтому результаты этих исследований имеют исключительно важное значение, так как позволяют своевременно обнаружить дефекты.

5. *Камеральная обработка материалов* в процессе проведения комплекса полевых работ должна осуществляться по мере накопления исходной гидрогеологической и технической информации. Целью ее является систематизация поступающих данных и составление отчетов.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВЕДКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Ранее отмечалось, что при изучении месторождений подземных вод необходимо учитывать некоторые их особенности изучения, которые отличают месторождения одно от другого. В табл. 10 в обобщенном виде изложены: перечень основных задач, характеризующих особенности поисков, разведки и оценки запасов основных типов месторождений, а также методические приемы решения этих задач. В последующих главах учебного пособия эти методические приемы решения гидрогеологических задач рассмотрены более подробно.

Таблица 10. Основные гидрогеологические задачи, решаемые при изучении отдельных типов месторождений подземных вод

Типы месторождений	Основные задачи	Методические приемы
Месторождения подземных вод речных долин	Изучение геолого-литологического и геоморфологического строения речной долины (по площади и в разрезе), строения и литологического состава пород продуктивного горизонта	Комплексная съемка и геофизические исследования, бурение поисковых и разведочных скважин (на стадиях детальных поисков и предварительной разведки)
	Изучение гидрологического режима поверхностного стока в годовом и многолетнем разрезе (в том числе уровенный режим стока соответственно 1, 5 и 95 %-ной обеспеченности), определение среднего минимального за 30-суточный период расхода реки 95 %-ной обеспеченности	Балансово-гидрометрические исследования, обобщение материалов многолетних наблюдений Гидрометслужбы СССР (на стадии предварительной разведки месторождения)
	Определение характера и степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также параметров, характеризующих эту взаимосвязь (суммарное гидравлическое сопротивление ΔL и пропускная способность русловых отложений реки A_0)	Специальные кустовые откачки, режимные наблюдения (на стадии предварительной разведки месторождения)
	Оценка естественных ресурсов и запасов, а также разведанных эксплуатационных запасов подземных вод	Гидрогеологические расчеты; эксплуатационные запасы определяются с помощью гидродинамического метода: а) аналитических расчетов путем преобразования гидрогеологических условий в расчетную геофильтрационную схему; б) при сложных условиях — путем математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ
Месторождения трещинно-карстовых вод карбонатных пород	Изучение литологического состава, геолого-структурных условий залегания, распространения и закономерностей формирования трещиноватости и закарстованности пород	Комплексная геолого-гидрогеологическая съемка, обработка кернового материала буровых скважин и данных геофизических исследований (на стадии детальных поисков)

Продолжение табл. 10

Типы месторождений	Основные задачи	Методические приемы
Месторождения трещинно-карстовых вод карбонатных пород	Изучение режима родникового стока (как показатель естественных ресурсов трещинно-карстовых вод) в многолетнем разрезе, а также условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод, в том числе режима паводковых расходов реки и условий их прохождения	Стационарные балансово-режимные наблюдения (на стадии предварительной разведки месторождения)
	Поиски в плане и в разрезе водовмещающих карбонатных пород наиболее трещиноватых и закарстованных обводненных зон с целью рационального размещения на перспективной площади поисково-разведочных гидрогеологических скважин и выбора наиболее продуктивной части водоносного горизонта	Комплексные геофизические методы исследований — наземных и каротажных исследований в скважинах (на стадии детальных поисков и предварительной разведки)
	Оценка естественных ресурсов и запасов трещинно-карстовых вод, а также разведанных эксплуатационных запасов	Для оценки естественных ресурсов используется гидрогеологический метод (по родниковому и подземному стоку), эксплуатационные запасы устанавливаются гидравлическим методом по данным опытно-эксплуатационных откачек из группы скважин или путем применения метода математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ
Месторождения на площади распространения линз пресных подземных вод	Выявление в плане и разрезе границ линзы пресных вод и условий ее распространения, мощности и литологического состава пород продуктивного горизонта и подстилающих пород, а также гидрогеохимических условий перспективного участка; определение параметров пласта	Комплексная геолого-гидрогеологическая съемка, геофизические методы разведки, бурение поисковых скважин (на стадии детальных поисков), опробование подземных вод

Продолжение табл. 10

Типы месторождений	Осиовные задачи	Методические приемы
Месторождения на площади распространения линз пресных подземных вод	Выявление и количественная оценка источников питания, определение испарения пресных подземных вод в условнях естественного залегания и будущей эксплуатации; выяснение условий взаимосвязи пресных и соленых подземных вод	Специальные гидрогеологические исследования, стационарные наблюдения за режимом подземных вод и балансовые исследования
	Для месторождений прикапальных линз пресных подземных вод необходимо установить гидрогеологические параметры пласта, условия взаимосвязи с поверхностными водами (форма гидравлической связи, инфильтрационные потери из канала, степень закольматированности русла канала, режим годового стока канала, качество поверхностных вод и др.)	Стационарные наблюдения за режимом подземных и поверхностных вод, бурение поисково-разведочных гидрогеологических скважин
	Количественная оценка источников питания пресных подземных вод, оценка разведанных эксплуатационных запасов подземных вод и разработка рекомендаций по предотвращению интрузии соленых вод в водозаборные скважины	Источники питания оцениваются с помощью гидрогеологических расчетов, разведанные запасы — гидродинамическим методом (аналитическими расчетами и математическим моделированием на АВМ нли ЭЦВМ)
Месторождения напорных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа	Выявление геолого-структурных условий залегания, строения и распространения многопластовой системы водоносных горизонтов (водоносного комплекса)	Геофизические исследования и бурение гидрогеологических скважин по поисковым поперечникам
	Определение гидрогеологических параметров пласта, условий формирования подземных вод водоносного комплекса и продуктивного горизонта (гидродинамическая и гидрогеохимическая зональность в вертикальном разрезе, условия взаимодействия между водоносными горизонтами и гидравлическая связь с поверхностными водами)	Бурение разведочных и наблюдательных скважин по поперечникам; проведение комплексных геофизических исследований, опытно-фильтрационных работ и опробования; организация комплексных стационарных наблюдений за режимом подземных и поверхностных вод

Продолжение табл. 10

Типы месторождений	Основные задачи	Методические приемы
Месторождения напорных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа	При расположении месторождения в речной долине необходимо изучить режим (сезонный и многолетний) поверхностного стока и определить гидрогеологические параметры, характеризующие гидравлическое сопротивление ΔL и пропускную способность русловых отложений реки A_0	Балансово-гидрометрические исследования; анализ многолетних даиных Гидрометслужбы СССР и режимных наблюдений; проведение кустовых откачек
Месторождения напорных подземных вод артезианских бассейнов горно-складчатых областей	Для месторождений, не связанных с речными долинами и поверхностными водами (приуроченных к синклинальным структурам), следует изучить геолого-структурные условия залегания, строения и распространения продуктивного водоносного горизонта	Комплексная геолого-гидрогеологическая съемка и геофизические исследования, бурение поисковых и структурных гидрогеологических скважин
	Для месторождений, приуроченных к речным долинам межгорных котловин, необходимо установить гидрологический режим (сезонный и многолетиий) поверхиостного стока, условия и параметры взаимосвязи подземных и поверхностных вод	Балансово-гидрометрические исследования, обработка материалов Гидрометслужбы СССР и данных кустовых откачек
	Оценка естественных ресурсов и запасов, а также разведанных эксплуатационных запасов	Естественные ресурсы устанавливаются с помощью гидрогеологического и гидрологического методов; эксплуатационные запасы — гидродинамическим методом (аналитические расчеты или моделирование)
Месторождения подземных вод на площади конусов выноса	Изучение геолого-структурных и геоморфологических условий образования конуса выноса, гидрогеологической горизонтальной зональности	Комплексная геологическая, гидрогеологическая и геоморфологическая съемка, геофизические исследования; бурение поисковых скважин

Продолжение табл. 10

Типы месторождений	Осиовные задачи	Методические приемы
Месторождения подземных вод иа площади конусов выноса	Оценка источников формирования подземных вод, их баланса, условий питания, формирования напорного режима и естественной разгрузки; определение подземного стока на площади конуса выноса	Стационарные балансово-гидрометрические исследования; изучение режима подземных вод
	Изучение гидрогеологических условий водовмещающей толщи песчано-галечниковых отложений и разделяющих слоев; определение гидрогеологических параметров; преобразование многослойной системы водоносных горизонтов в двух-трехслойную среду	Опытиые и кустовые откачки; анализ гидродинамических данных (пьезометрические уровни водоносных пластов и разделяющих слоев) по скважинам
	Оценка естественных ресурсов и запасов подземных вод, а также разведанных эксплуатациоиных запасов	Естественные ресурсы и запасы определяются с помощью гидрогеологического метода, эксплуатационные запасы — гидродинамическим методом (аналитические расчеты, преобразование гидрогеологических условий в расчетную геофильтрационную схему и выбор типовых расчетных зависимостей), при сложных условиях следует применить метод математического моделирования
Месторождения трещинно-жильных подземных вод зон тектонических нарушений	Выявление геолого-структурных условий формирования зон тектонических нарушений (залегание, мощность, структура тектонического нарушения)	Геолого-структурная съемка; геофизические исследования; бурение поисково-структурных скважин
	Определение гидрогеологических особенностей месторождения (условия питания и естественной разгрузки, качество подземных вод и их связь с поверхностными водами, фильтрационная неоднородность водовмещающих пород)	Детальная гидрогеологическая съемка; бурение гидрогеологических скважин; опытные откачки и опробование

Продолжение табл. 10

Типы месторождений	Основные задачи	Методические приемы
Месторождения трещинно-жильных подземных вод зон тектонических нарушений	Оценка естественных ресурсов и разведанных эксплуатационных запасов подземных вод	Естественные ресурсы определяются балансовым методом, разведанные запасы — гидравлическим методом по данным групповой пробно-эксплуатационной откачки
Месторождения напорных вод межморенных отложений	Выяснение геолого-гидрогеологических условий распространения на месторождении продуктивного водоносного горизонта и связи подземных вод с поверхностными (гидрогеологические параметры взаимосвязи), а также гидрологического режима (сезонного и многолетнего)	Комплексная гидрогеологическая съемка; бурение поисковых скважин; анализ многолетних данных Гидрометслужбы СССР
	Оценка естественных ресурсов и разведанных эксплуатационных запасов	Естественные ресурсы могут быть оценены гидрогеологическим методом, эксплуатационные — гидродинамическим (схематизация гидрогеологических условий в расчетную схему и последующие расчеты)

Раздел IV.

МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глава 10

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СЪЕМКА И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Назначение и задачи исследований. Выше отмечалось (см. гл. 8), что на стадии детальных поисков на изучаемой площади необходимо провести специализированную гидрогеологическую съемку. В результате детальных поисков должна быть выделена площадь возможного распространения месторождения подземных вод и обоснована постановка предварительной его разведки.

В дальнейшем, на стадии предварительной и детальной разведки, следует продолжить изучение гидрогеологических условий, вначале в границах выявленного месторождения подземных вод, а затем непосредственно в пределах участка будущего водозаборного сооружения.

Инструкцией ГКЗ СССР [14] предусматриваются следующие требования к составлению специализированных гидрогеологических карт в процессе разведки месторождений: 1) непосредственно по району месторождения подземных вод должна быть составлена гидрогеологическая (при необходимости и геологическая) карта с соответствующими разрезами и другими графическими материалами; 2) на карте должны быть отображены особенности геологического строения и гидрогеологических условий района распространения основных водоносных горизонтов изучаемого объекта, их естественные границы, закономерности изменения качества подземных вод, месторождения в районе действующих водозаборов, участки с разведанными запасами подземных вод, гидрометрические створы, участки сброса бытовых и промышленных стоков и других возможных источников загрязнения подземных вод продуктивного горизонта. Масштабы карт и других графических материалов инструкцией [14] не регламентируются: они определяются в каждом конкретном случае необходимостью наглядного отражения приведенного выше перечня информации; 3) непосредственно по разведочному участку должны быть составлены специализированная гидрогеологическая (при необходимости и геологическая) карта и разрезы, отражающие геологическое строение и гидрогеологические условия участка. Выбор масштабов таких карт определяется

необходимостью отразить распространение, мощность, строение и условия залегания водоносных горизонтов на площади разведочного участка; литологический состав и характер изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород; положения уровней подземных и поверхностных вод, их качество и т. д.

Для выполнения этих требований на стадии предварительной разведки в районе месторождения целесообразно провести детальные гидрогеологические исследования (маршрутные обследования, наземные геофизические работы, а в случае необходимости, при сложных условиях объекта, бурение картировочных скважин). Если по району месторождения отсутствует геологическая основа необходимого масштаба, детальные исследования должны иметь комплексный характер.

Гидрогеологические карты района месторождения могут быть составлены по результатам детальных исследований, а также путем обобщения и анализа материалов детальных поисковых работ.

На стадии детальной разведки необходимо составить детальную гидрогеологическую карту участка будущего водозаборного сооружения. Составление ее осуществляется на инструментальной основе с учетом данных предварительной и детальной разведок.

Большую помощь при проведении разведочных работ могут оказать современные методы геофизики, это направление исследований можно назвать гидрогеофизическим. Эффективность применения геофизических методов определяется тем, что в общем комплексе поисково-разведочных гидрогеологических работ они позволяют: 1) увеличить число пунктов дискретного опробования перспективной на подземные воды геологической структуры, тем самым повысить достоверность экстра- и интерполяции гидрогеологической информации по площади месторождений; 2) целенаправленно и рационально разместить на площади месторождения поисково-разведочные скважины, что в большинстве случаев приводит к повышению гидрогеологической эффективности буровых работ и снижению продолжительности разведки месторождения.

Выделяются следующие, общие для всех типов месторождений, группы геолого-гидрогеологических задач, которые можно решить путем применения методов разведочной геофизики: а) литологическое расчленение изучаемого разреза, картирование по площади водоносных и слабопроницаемых разделяющих пластов различного литологического состава с учетом их фациальной изменчивости в плане; б) выяснение степени трещиноватости и закарстованности водовмещающих карбонатных пород и их изменчивости по площади и в разрезе; в) изучение строения и состава русловых и донных отложений в реках, озерах и водохранилищах; г) исследование гидрогеохимической зональности подземных вод по площади и в разрезе (по степени их минерализации); д) выделение по площади и в разрезе

таликовых зон в области распространения многолетнемерзлых пород.

Ниже изложены основные положения, характеризующие общее направление, содержание и методические приемы проведения геофизических работ при поисках и разведке месторождений подземных вод. Более подробно геофизические методы исследований изложены в ряде опубликованных работ [9,15, 21, 22].

Комплекс наземных гидрогеофизических исследований. Перечисленные выше геолого-гидрогеологические задачи в большинстве своем могут быть решены одним из следующих методов или их комплексом: а) электроразведка методом сопротивлений (с использованием постоянного или низкочастотного тока); б) электроразведка методом вызванной поляризации; в) электроразведка методом естественного электрического поля; г) сейсморазведка методом преломления волн; д) электроразведка с использованием высокочастотных электромагнитных полей.

Все эти методы обеспечены отечественной серийной аппаратурой, для них в достаточной степени разработаны теоретические и методические основы, поэтому они могут быть применены в производственных масштабах. Очень важно учитывать разрешающую способность того или иного геофизического метода или их различных комбинаций при решении гидрогеологических задач. В табл. 11 приведены некоторые данные, характеризующие возможность применения различных геофизических методов для решения гидрогеологических задач применительно к основным месторождениям подземных вод промышленного типа (см. табл. 4).

Исходными данными для качественной и количественной геолого-гидрогеологической интерпретации результатов геофизических исследований являются материалы специального параметрического бурения скважин, их каротажа и опытно-фильтрационных исследований. Основным приемом количественной геолого-гидрогеологической интерпретации является составление и последующее использование корреляционных эмпирических зависимостей и номограмм, отражающих связь геофизических параметров с гидрогеологическими параметрами и свойствами горных пород.

По назначению параметрические скважины можно подразделить на две группы: а) картировочные гидрогеологические скважины; б) скважины для изучения гидродинамических параметров.

В скважинах первой группы должны быть выполнены: опробование для определения гранулометрического состава пород по всем литологическим разностям, поинтервальное качественное опробование водоносного горизонта и пробная откачка. Обязательным является каротаж параметрических скважин.

Первым этапом полевых геофизических работ должно стать проведение рекогносцировочных исследований по одному-двум

профилям с использованием всех запроектированных методов. Одновременно по этим профилям выполняется бурение параметрических скважин и их опробование, исходя из целей геофизических исследований. В результате работ данного этапа уточняется проект проведения наземных работ, схема расположения сети геофизических точек наблюдения и схема геолого-гидрогеологической интерпретации, включающая соответствующие корреляционные зависимости. На втором этапе полевых работ проводятся площадные геофизические работы, направленные на поиск участков, перспективных для разведки месторождения.

По результатам геолого-гидрогеологической интерпретации материалов площадных геофизических исследований с учетом данных опорного бурения должны быть составлены геолого-геофизические разрезы по профилям для всей поисковой площади работ с вынесением на них литологического строения разреза, положения уровня подземных вод первого от поверхности безнапорного водоносного горизонта, границ с различной степенью минерализации подземных вод, водопроводимости основных водоносных горизонтов.

Таким образом, геофизические методы исследований являются основой для целенаправленного размещения по площади поисков объемов буровых и опытно-фильтрационных работ.

Комплекс каротажных геофизических исследований скважин является неотъемлемой частью разведочных гидрогеологических работ. В основе применения различных каротажных геофизических методов лежит определение природное или вызванное (искусственное) распределение физических полей. По способам реализации теоретических предпосылок все методы каротажа гидрогеологических скважин можно подразделить на три группы: а) методы, с помощью которых изучается распределение показателей физических полей, характеризующих свойства горных пород; б) методы, с помощью которых изучается распределение показателей физических полей, обусловленных свойствами системы скважина — пласт; в) методы, с помощью которых изучается распределение показателей физических полей, отражающих процессы энерго- и массопереноса.

В табл. 12 приведены задачи, которые могут быть решены с помощью геофизических методов исследования гидрогеологических скважин: изучение литолого-геологического строения и гидрогеологических условий в точке бурения, а также закономерностей их изменчивости в пространстве на площади разведочного участка месторождения. По способу интерпретации исходной геофизической информации все методы разделяются на три группы: а) прямые методы интерпретации, применяемые в том случае, когда результат исследования скважины адекватно отвечает искомой характеристике; б) функциональные методы интерпретации, используемые в том случае, когда результат исследования скважины связан с иско-

Таблица 11. Основные методы наземных геофизических исследований, рекомендуемые при проведении поисково-разведочных гидрогеологических работ

Тип месторождения	Геологические задачи по стадиям			Геофизические методы (оптимальная глубина исследований)		
	Поиски	Разведка		Поиски	Разведка	
		предварительная	детальная		предварительная	детальная
Месторождения подземных вод речных долин	Картирование литологического состава пород по площади: а) распространения водоносного горизонта в аллювиальных отложениях	Детализация изменчивости мощности продуктивного водоносного горизонта по площади; выделение зон повышенной трещиноватости и закарстованности водоносных коренных пород	Качественная характеристика условий взаимосвязи поверхностных и подземных вод в береговой зоне в пределах возможного развития депрессионной воронки	ВЭЗ (до 200 м)	ВЭЗ ВП (до 150 м); сейсморазведка (до 50 м)	Метод естественного электрического поля, ЭП, термометрия
	б) водоносного горизонта в коренных породах	Изучение строения подрусловых отложений реки, выявление мест питания подземных вод и их разгрузки в русло реки	То же	ВЭЗ (до 200 м); сейсморазведка (до 50 м)	ЭП, естественное электрическое поле, термометрия	Сейсморазведка
	Оконтуривание площади погребенных долин	Обоснование заложения разведочных скважин	—	ВЭЗ ВП (до 150 м); сейсморазведка (до 50 м)	—	—

Месторождения подземных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа	Изучение геолого-гидрогеологического строения бассейна, картирование литолого-фациальных особенностей и гидрогеохимических условий месторождения, а также задачи, перечисленные выше	Детализация литологического расчленения разреза продуктивных водоносных горизонтов и перекрывающих их пород осадочного чехла	Дальнейшая детализация разреза продуктивных водоносных горизонтов и перекрывающих пород	ВЭЗ (до 300 м)	ВЭЗ ВП (до 200 м), ВЭЗ (до 300 м)	Специальные режимные наблюдения
	—	Изучение фильтрационных свойств водоносных горизонтов и литолого-фациальной изменчивости слабопроницаемых разделяющих толщ	—	—	ВЭЗ ВП (на глубинах до 150—200 м)	—
	—	Картирование гидрогеохимической зональности подземных вод	—	—	ВЭЗ (до 300 м)	—
	—	Выявление участков повышенной трещиноватости и закарстованности карбонатных пород; обоснование заложения разведочных скважин	—	ВЭЗ (до 300 м)	ВЭЗ ВП (частично в круговом варианте); сейсморазведка	—

Продолжение табл. 11

Тип месторождения	Геологические задачи по стадиям			Геофизические методы (оптимальная глубина исследований)		
	Поиски	Разведка		Поиски	Разведка	
		предварительная	детальная		предварительная	детальная
Месторождения подземных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа	—	Выявление литологических «окон» и границ продуктивного горизонта в краевых частях бассейна	—	—	ЭП, ВЭЗ, сейсморазведка	—
Месторождения подземных вод на площади конусов выноса	Картирование мощности и площадного распространения рыхлообломочных водовмещающих пород	Изучение изменчивости фильтрационных свойств водоносного горизонта	—	ВЭЗ (до 300 м)	ВЭЗ ВП (до 200 м)	Как правило, постановка геофизических работ нецелесообразна
		Картирование глубины залегания уровня подземных вод	—	—	ВЭЗ, ВП, сейсморазведка	—
		Картирование степени минерализации подземных вод; обос-	—	—	ВЭЗ, ВЭЗ ВП	—

		нование заложения разведочных скважин				
Месторождения линз пресных вод песчаных массивов пустынь и полупустынь	Поиски линз пресных вод	Литологическое расчленение разреза, оконтуривание площади линзы	Изучение скорости продвижения фронта некондиционных вод в процессе опытных откачек	ВЭЗ (до 200 м)	ВЭЗ, ВЭЗ ВП (до 100 м)	Режимные электрические наблюдения
		Картирование изменчивости мощности продуктивного (по площади распространения)	—	—	ВЭЗ ВП (до 100 м)	—
		Определение границ зон с различной минерализацией подземных вод	—	—	ВЭЗ (до 200 м)	—
Месторождения подземных вод флювиогляциальных межморенных четвертичных отложений	Литологическое расчленение разреза, оценка общей мощности четвертичных отложений	Обоснование заложения разведочных и наблюдательных скважин	Детализация разреза для выбора точек заложения разведочных скважин	ВЭЗ ВП (до 200 м)	ВЭЗ ВП	ВЭЗ ВП
	Качественная характеристика фильтрационных свойств пород водоносного горизонта	—	—	ВЭЗ ВП		

Примечание. ВЭЗ — вертикальное электрозондирование; ЭП — электропрофилирование; ВП — вызванные потенциалы.

Таблица 12. Основные задачи, которые могут быть решены при геофизических каротажных методах исследования гидрогеологических скважин

Методы	Физические основы метода	Решаемые гидрогеологические задачи
Каротаж сопротивления	Различное электрическое сопротивление разных горных пород	Литологическое расчленение горных пород вскрытых скважиной. Выделение по разрезу зон усиленной трещиноватости и закарстованности водоносных коренных пород
Боковое каротажное зондирование (целесообразно сочетать с гамма-каротажем)	Зависимость значений кажущегося сопротивления от характера приближения их к величине истинного сопротивления горных пород	Оценивается степень минерализации подземных вод в песчаных пластах и пористость последних
Микрокаротаж (целесообразно сочетать с БКЗ, ПС и ГК)	Различное электрическое сопротивление разных горных пород	Выявление наиболее водообильных зон в рыхлосцементированных песчано-глинистых отложениях, вскрытых скважиной
Гамма-каротаж	Различня горных пород по степени естественной радиоактивности (по гамма-излучению)	Расчленение лнтологического разреза скважин (данные ГК целесообразно интерпретировать в комплексе с кривыми КС и ПС)
Термокаротаж	Распределение значений естественного теплового поля в разрезе скважин (в естественных условиях залегания подземных вод и в нарушенных условиях — в процессе откачки)	Изучение гидрогеологических условий в разрезе вскрытых скважиной пород
Резистивиметрия	Различие электрического сопротивления между электролитом, заполняющим скважину, и подземными водами (между скоростью фильтрации и скоростью разбавления электролита существует строгая зависимость)	Выделение в разрезе скважин зон с различной проницаемостью и определение их мощности (наиболее достоверные данные могут быть получены при изучении безнапорных подземных вод)
Расходометрия	Сравнение расходограмм, полученных в естественных и нарушенных (откачкой) условиях	Выделение наиболее проницаемых зон (благоприятным для применения метода условием является наличие в скважине устойчивых терригенных и карбонатных пород)

Примечание. БКЗ — боковое каротажное зондирование; ГК — гамма-каротаж.

мой характеристикой функциональными зависимостями, полученными из теоретических или экспериментальных исследований общего характера; в) эмпирические методы интерпретации, применяемые в том случае, когда связь между измеренными и искомыми показателями носит вероятностный характер (она может быть известна из общегеологических предпосылок, но выявлена и уточнена в результате конкретного опыта работ). Обычно эмпирические способы интерпретации оперируют корреляционными зависимостями парного или многомерного вида. При использовании комплексных методик исследования можно компенсировать ограниченность или частные недостатки отдельных методов.

Изучение геологического строения разреза гидрогеологических скважин. Для характеристики геологического строения разрезов скважин в практике геофизических работ применяется комплекс методов: КС, ПС, ГК. Совокупность каротажных диаграмм, полученных указанными методами, дает картину геологического строения разреза. В методике геологической интерпретации данных каротажных геофизических исследований следует различать два уровня: а) изучение геолого-литологического строения разреза конкретной скважины (расчленение разреза по данным каротажа на отдельные слои с возможной для различных методов подробностью); б) изучение геолого-литологического строения по площади разведочного участка (возможность идентификации различных слоев, установленных в разных точках (скважинах) территории, для выявления закономерностей их залегания в пространстве — изучение фациальной изменчивости слоев в разрезе, стратиграфическая привязка различных толщ и геолого-тектонические построения).

В литологическом расчленении разреза по результатам геофизического каротажа можно выделить несколько этапов.

На первом этапе производится расчленение разреза на слои, каждый из которых характеризуется только ему присущим набором признаков и значений геофизических параметров, причем каждую диаграмму комплекса на этом этапе целесообразно расчленять на слои самостоятельно. Критериями для расчленения могут служить: а) отличие одного слоя от другого по среднему значению какого-либо показателя (с учетом теоретической формы кривых каротажа); б) характерная форма диаграммы (градиентное изменение показателя с глубиной, расчлененность кривой и т. п.).

Выделенные по разным диаграммам границы следует рассматривать как первое приближение в выявлении литолого-стратиграфического разреза скважины. При таком подходе к интерпретации разные диаграммы выступают равноправно, что способствует уменьшению числа субъективных решений.

На втором этапе диаграммы сопоставляются между собой для выявления влияния различных природных и технических факторов, которое возможно имело место в процессе

исследований на каждую из них. При этом целесообразно сначала выяснить влияние технических условий измерения. В процессе такого анализа часть выделенных слоев отпадает, а другие объединяются в более общие подразделения с выделением внутри них частных особенностей. Эти укрупненные подразделения, естественно, должны характеризоваться более четко выраженными границами.

На третьем этапе необходимо установить геологическое содержание каждого из выделенных слоев. Для этого необходимо иметь геофизическую характеристику каждой горной породы, встречающейся в районе исследования (по данным каротажа параметрических скважин), по всем диаграммам геофизического комплекса.

Гидрогеологическая характеристика разреза. При изучении водоносности отложений по результатам геофизических исследований можно выявить водосодержащие породы, провести анализ фильтрационной изменчивости пород в разрезе и оценить их эффективную мощность. В решении этих задач можно выделить два этапа. Первый этап соответствует условиям получения информации в данной точке бурения. На втором этапе проводится обобщение информации по площади исследований с выявлением общих закономерностей водоносности вскрытых отложений для составления литолого-гидрогеологических профилей.

Признаками для выделения в разрезе интервалов с повышенной пористостью и проницаемостью вскрытых пород (в случае бурения скважины с промывкой забоя глинистым раствором) могут быть: а) различия в показаниях градиент- и потенциал-микрозондов, совмещенных по координатным осям; б) увеличение или уменьшение аномалий ПС вплоть до изменения знака при повторном измерении ПС после изменения минерализации бурового раствора.

В тех случаях, когда скважина пробурена с промывкой забоя технической водой, складываются условия, благоприятные для изучения фильтрационных процессов методами резистивиметрии, расходометрии и термометрии. Интерпретационными признаками водоносных пород в этих условиях может являться наличие: а) интервалов опреснения электролита в скважине, фиксируемых по совокупности последовательно регистрируемых кривых резистивиметрии; б) интервалов изменения расхода осевого потока воды по стволу скважины, фиксируемых расходограммой в неработающей (в естественных условиях) или работающей скважине (при откачках); в) интервалов изменения на термограмме (по стволу неработающей или работающей скважины) со значением первой производной, резко отличающейся от значения нормального температурного градиента.

При интерпретации данных, полученных методом резистивиметрии, для выделения водосодержащих пород в гидрогеологически сложных разрезах нужно учитывать, что характер опреснения электролита в стволе скважины может быть усложнен

перетеканием воды между водоносными зонами. Оценка фильтрационных свойств водовмещающих пород и определение закономерности их изменчивости в пространстве должны быть произведены в два этапа: 1) изучение фильтрационных свойств пород в разрезе скважины; 2) выявление общих закономерностей формирования фильтрационного разреза месторождения (разведочного участка).

По результатам расходометрии может быть получена информация о фильтрационных свойствах горных пород открытых и фактически работающих пластов. Следует, однако, учесть, что по результатам геофизических исследований, отнесенных к эмпирической группе, можно получить непрерывную геофизическую информацию по всему разрезу скважины, причем эти исследования (радиоактивные методы) могут быть проведены в заглинизированных или закрепленных трубами скважинах. В связи с этим целесообразно сочетать традиционные геофизические методы исследований и расходометрию.

При комплексных исследованиях скважин по результатам расходометрии можно приближенно оценить значения коэффициента фильтрации водоносных пластов, опробуемых в данном эксперименте [9].

По результатам изучения фильтрационных свойств пород и их распределения в разрезе отдельных скважин следует произвести обобщенный анализ для выявления общих закономерностей изменения фильтрационных свойств в разрезе и в плане разведочного участка. Выявленные таким путем закономерности могут быть использованы для уточнения структуры электрической модели месторождения и выбора точек заложения эксплуатационных скважин.

Глава 11
БУРОВЫЕ РАБОТЫ

НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ РАБОТ

Буровые работы являются основным видом гидрогеологических исследований, которые выполняются при поисках, разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Это определяется многими факторами, среди которых необходимо отметить следующие:

1) бурение гидрогеологических скважин позволяет непосредственно вскрыть и изучить геолого-литологический разрез, условия залегания и распространения выбранного под разведку продуктивного водоносного горизонта. С помощью бурения скважин можно также изучить весь разрез горных пород, залегающих над продуктивным горизонтом и под ним. Результаты буровых работ, таким образом, позволяют выявить граничные условия фильтрационного потока продуктивного горизонта в плане и разрезе. Эта информация необходима для составления расчет-

ной схемы разведочного участка. В подавляющем большинстве случаев действующие водозаборные сооружения представляют собой системы рационально размещенных на площади разведочного участка буровых скважин. Учитывая исключительно большое значение буровых работ при поисках и разведке месторождений подземных вод, очень важно в процессе проектирования гидрогеологических исследований выбрать и обосновать технологию проходки скважин, необходимые для этого технические средства, конструкции скважин и способы оборудования их фильтрами. В комплекс буровых работ при разведке месторождений подземных вод входят: выбор схемы размещения скважин по площади поисков и на разведочном участке; бурение гидрогеологических скважин; первичная геолого-гидрогеологическая и техническая документация скважин по мере их проходки; предварительное опробование подземных вод; каротажные геофизические исследования; оборудование скважин фильтрами;

2) буровые скважины по существу являются единственным техническим средством, позволяющим с высокой степенью достоверности оценить качество и количество подземных вод выбранного под разведку продуктивного и всех смежных водоносных горизонтов, залегающих в разрезе. Кроме того, по пробуренным на площади разведочного участка скважинам можно изучить фильтрационные свойства пород, слагающих продуктивный водоносный горизонт и разделяющие слои, а также определить их гидрогеологические параметры. Данные, характеризующие гидрогеологические параметры, являются основной информацией для количественной оценки разведанных запасов подземных вод. С помощью буровых скважин можно оборудовать на площади разведочного участка опорную и вспомогательную наблюдательную сеть для стационарного изучения режима подземных вод, как в период разведки месторождения, так и во время его эксплуатации;

3) буровые скважины являются очень эффективным техническим средством для каптажа подземных вод, обеспечивающим длительную их эксплуатацию.

По назначению все гидрогеологические скважины при поисках и разведке месторождений подземных вод могут быть подразделены на: а) группу поисковых, картировочных скважин; б) группу разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин; в) группу наблюдательных скважин.

Бурение поисковых и картировочных скважин обычно производится на стадии детальных поисков в процессе проведения специализированной гидрогеологической съемки, которая, как отмечалось, является основным методом поисков месторождений подземных вод. Бурение этих скважин выполняется с целью: а) изучения литолого-геологического разреза пород, слагающих район исследования; б) выделения в разрезе вскрытых пород водоносных горизонтов и выяснения условий их распростране-

ния; в) предварительного качественного и количественного опробования подземных вод; г) выбора под разведку продуктивного водоносного горизонта для последующего более детального изучения. В процессе детальных поисков в слабо изученных районах или в районах со сложными в вертикальном разрезе гидрогеохимическими условиями может возникнуть необходимость бурения поисково-структурных скважин на глубину, превосходящую уровень залегания выбранного под разведку продуктивного водоносного горизонта.

Бурение разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин обычно производится на площади перспективного участка, выделенного ранее на стадии предварительной и детальной разведки. Конструкции разведочных скважин, их диаметр и глубина должны обеспечить возможность установки в них насосного оборудования для последующего проведения откачек и наблюдений за уровнем подземных вод при опытных работах.

Конструкции разведочно-эксплуатационных скважин (диаметр скважин и фильтры) необходимо выбрать с таким расчетом, чтобы они обеспечивали возможность последующей эксплуатации скважины (после завершения разведки месторождения) с проектной для данного месторождения производительностью. Бурение производится на стадии детальной разведки, согласно с выбранной схемой водозаборного сооружения.

Выбор конструкции скважин зависит от ряда факторов (их назначения, геологических и гидрогеологических условий, экономической целесообразности и т. д.) и определяется в каждом конкретном случае проектом работ по разведке месторождений подземных вод. Ниже приведены общие рекомендации по выбору и обоснованию конструкций скважин:

1) поисково-картировочные скважины должны иметь простые конструкции, лишь в верхней части, у устья выработки, производится крепление обсадной трубой, остальная часть ствола скважины при благоприятном геологическом разрезе трубами не обсаживается. В сложных гидрогеологических условиях или для изоляции интервалов интенсивного поглощения промывочной жидкости ствол скважины может закрепляться одной обсадной колонной. Диаметр поисково-картировочных скважин может изменяться от 132 до 76 мм;

2) конструкции разведочных скважин предусматривают посадку водоподъемной колонны. Верхний интервал скважины должен быть закреплен кондуктором (направлением). Для изоляции верхних водоносных горизонтов или перекрытия интервалов поглощения промывочной жидкости предусматривается спуск одной (реже двух) промежуточных (технических) колонн. Изоляция водоносных горизонтов осуществляется методами временного (глинистыми шариками) и постоянного (цементным раствором) тампонажа. В конструкции гидрогеологической скважины различают направляющую (кондуктор), промежуточную (техническую) и эксплуатационную колонны. В неглу-

боких (до 150 м) скважинах техническая колонна может не применяться;

3) для последовательного опробования двух-трех водоносных горизонтов может быть применена конструкция скважины, в которой предусматривается цементный мост (рис. 25);

4) конструкции разведочно-эксплуатационных скважин, рассчитанных на многолетнюю эксплуатацию, характеризуются тем, что обсадные колонны обязательно цементируются. Тщательная изоляция затрубного пространства позволяет предотвратить гидравлическую связь водоносных горизонтов. Применение таких конструкций необходимо при разведке, например, месторождений в сложных гидрогеохимических условиях. На рис. 26 приведены схематические конструкции разведочных гидрогеологических скважин. Телескопическая конструкция разведочных скважин обычно применяется при бурении выработок ударно-канатным способом. При разведке глубокозалегающих (более 500 м) напорных водоносных горизонтов целесообразно применять одноколонную конструкцию скважин. Многозабойные гидрогеологические скважины целесообразно применять при разведке месторождений трещинно-карстовых вод и трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений, водосодержащие породы которых, как правило, обладают высокой степенью фильтрационной неоднородности. Вспомогательные буровые скважины, пройденные с основного ствола выработки, дают возможность вскрыть дополнительные обводненные зоны;

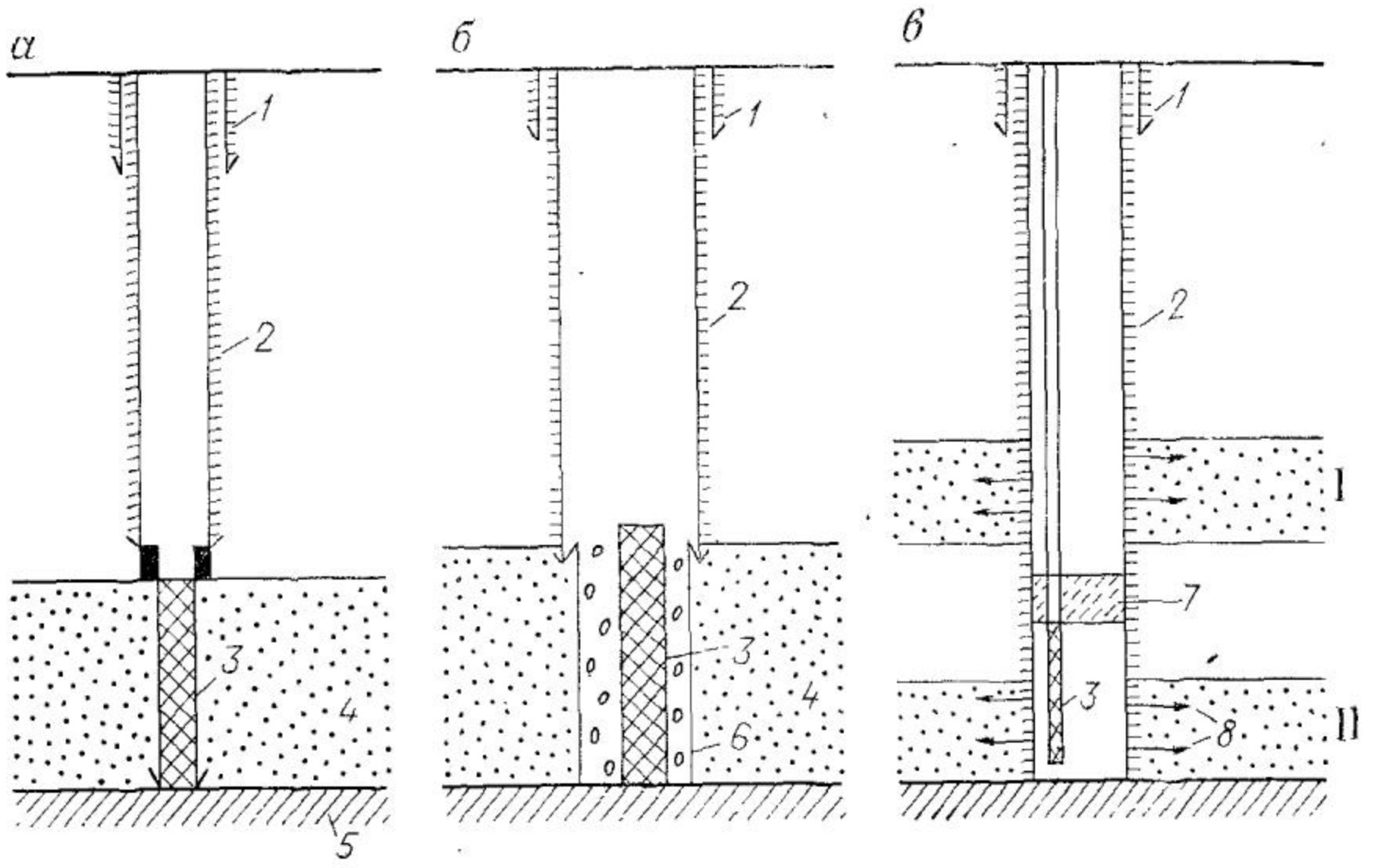


Рис. 25. Конструкции разведочных гидрогеологических скважин, пройденных роторным способом *(а, в)* и роторным способом с обратной промывкой *(б)*.
1 — направляющий кондуктор; *2* — рабочая колонна; *3* — фильтр; *4* — водоносные породы; *5* — непроницаемые породы; *6* — гравийная обсыпка фильтра; *7* — цементный мост; *8* — подземная перфорация обсадной колонны. I, II — водоносные горизонты

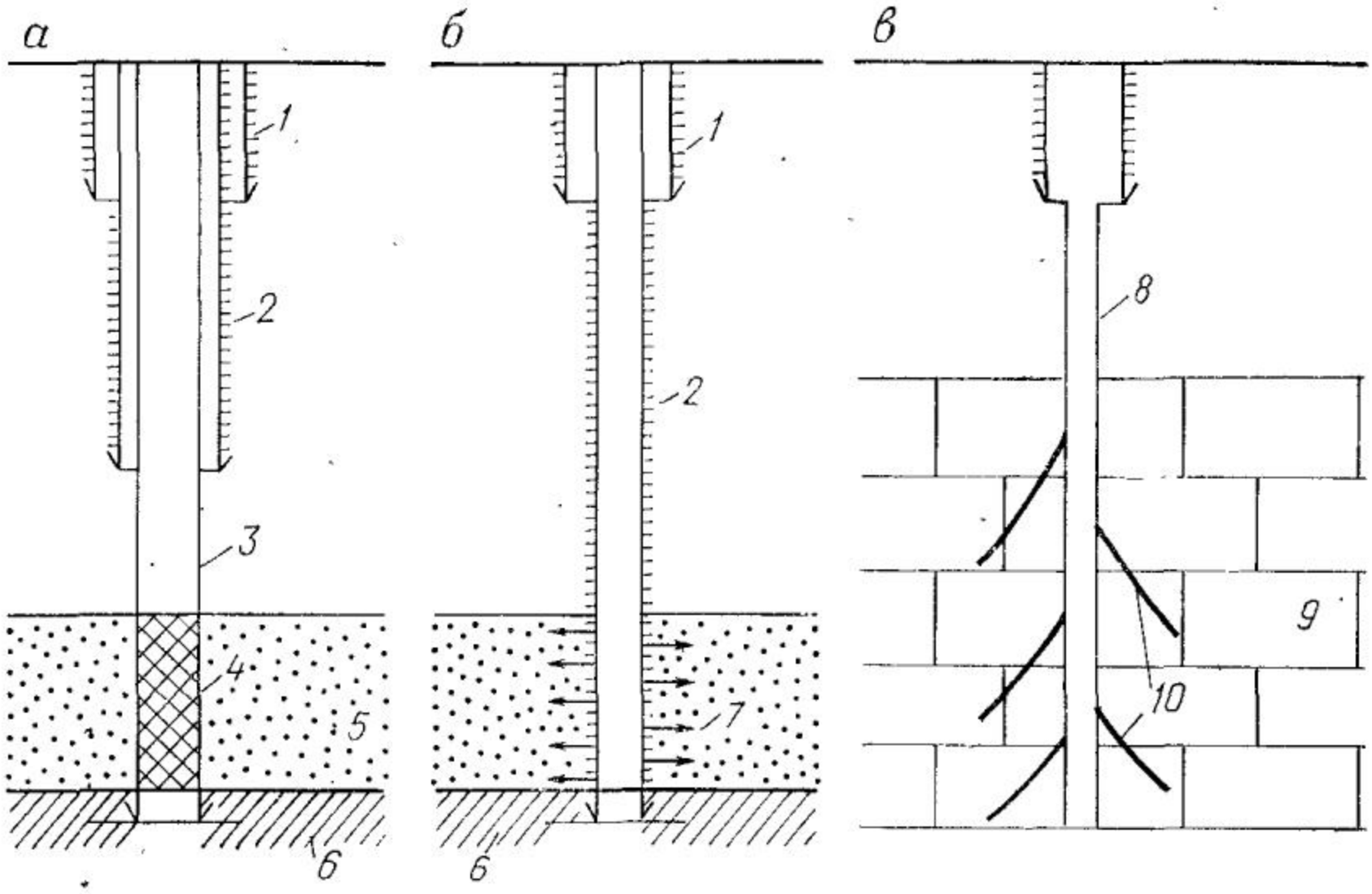


Рис. 26. Конструкции разведочных гидрогеологических скважин, пройденных различными способами:

а — телескопическая (бурение ударно-канатным способом); *б* — одноколонная (бурение роторным способом); *в* — многозабойная (бурение комбинированным (роторным и колонковым) способом в карбонатных породах). *1* — направляющий кондуктор; *2* — рабочая колонна; *3* — колонна с фильтром; *4* — фильтр; *5* — водоносные пески; *6* — непроницаемые породы; *7* — перфорация колонны (для связи с водоносным горизонтом); *8* — открытый (незакрепленный) ствол скважины; *9* — водоносные карбонатные породы; *10* — боковые скважины

5) наблюдательная скважина должна иметь более простую конструкцию: обычно устанавливается одна обсадная колонна с фильтром, верхний участок колонны у устья скважины цементируется. Диаметр обсадной колонны должен обеспечивать возможность проведения гидрогеологических наблюдений и обычно составляет 73—108 мм. Если наблюдения ведутся на нескольких водоносных горизонтах, то на каждом из них оборудуется скважина. Реже применяются конструкции наблюдательных скважин, в которых одновременно ведется наблюдение за двумя водоносными горизонтами. В таких скважинах требуется более сложная технология работ, заключающаяся в установке двух тщательно изолированных друг от друга фильтров и двух колонн наблюдательных трубок.

Важным разделом буровых работ является первичная комплексная документация скважин: техническая, геологическая и гидрогеологическая. Документация обычно оформляется в специальном буровом журнале, в котором фиксируются следующие основные данные: а) технология проходки скважин (диаметр, глубина, углубление за вахтенную смену, техническое состояние выработки, условия обсадки, выход рабочей колонны, условия отбора керна и др.); б) геологические и гидрогеологические условия (первичное описание литологического состава керно-

вого материала, режим промывочной жидкости в процессе бурения, глубины появления вскрытого водоносного горизонта и уровня подземных вод, отбор проб воды для предварительного изучения качества подземных вод и др.).

СПОСОБЫ БУРЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

В практике гидрогеологических исследований наиболее широкое применение получили следующие способы бурения скважин: а) вращательный с прямой промывкой глинистым раствором; б) вращательный с продувкой забоя воздухом; в) вращательный с обратной промывкой; г) ударно-канатный.

Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки, а следовательно, и рациональную область применения в соответствии с решением конкретных задач, а также геолого-гидрогеологическими условиями производства работ. В табл. 13 приведены некоторые рекомендации по применению различных способов бурения гидрогеологических скважин.

В настоящее время основным способом проходки гидрогеологических скважин является вращательное бурение с прямой промывкой. На долю этого способа приходится около 80 % всех объемов бурения в нашей стране, в то время как объемы бурения ударно-канатным способом снизились и составляют всего около 10 % от общего объема. Вращательное бурение с обратной промывкой забоя скважины получило применение при сооружении высокодебитных скважин в мягких и рыхлых породах.

На эффективность проходки скважин влияет не только способ бурения, но и технология вскрытия и освоения водоносных пластов. В процессе бурения необходимо свести к минимуму кольматацию пласта и обеспечить получение максимальных для данных гидрогеологических условий дебитов скважин.

Технология вращательного бурения с прямой промывкой предусматривает использование таких способов вскрытия и освоения водоносных горизонтов, которые обеспечивают минимальную кольматацию. Широкое применение получила технология вскрытия водоносных горизонтов технической водой, водогипановыми растворами, нефтеэмульсионными и другими промывочными жидкостями. Если при бурении скважины применяется глинистый раствор, то должны быть использованы эффективные способы освоения водоносного пласта: с помощью струйных снарядов (способ Промбурвода), расширением ствола в зоне продуктивного водоносного горизонта, тщательной разглинизацией фильтров скважин через промывочные «окна», взрывом торпед детонирующего шнура, пневмопрострелом и др.

ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Важной частью конструкции гидрогеологических скважин являются фильтры, связывающие ствол скважины с водоносным горизонтом. Они должны иметь достаточную механическую

Таблица 13. Рекомендации по применению различных способов бурения гидрогеологических скважин

Способ бурения	Преимущества	Недостатки	Рекомендации по применению
Вращательный с прямой промывкой глинистым раствором	Высокие механические и коммерческие скорости бурения; возможность бурения в породах разной твердости на различные глубины; малая металлоемкость конструкций	При бурении с глинистым раствором трудности качественного опробования водоносных пластов и их освоения, что приводит к снижению дебитов скважин, требует проведения длительных и сложных работ по разглинизации пройденной скважины; необходимость снабжения установок водой и глиной; трудности бурения в породах, содержащих валунно-галечниковые включения, и в породах, поглощающих промывочную жидкость; трудность организации работ в зимнее время при больших отрицательных температурах воздуха	Целесообразно применять при бурении в породах различной твердости и на разные глубины; при применении испытателей пластов для опережающего способа опробования на стадии поисково-разведочных работ
Вращательный с продувкой забоя воздухом	Высокие механические скорости бурения, превышающие аналогичные показатели при бурении с промывкой жидкостью до двух раз; отсутствие необходимости в снабжении буровых установок водой и глиной; возможность качественного опробования и каптажа водоносных пластов; бурение в многолетнемерзлых породах, в породах, поглощающих промывочный раствор	Трудности бурения при наличии водопритоков в скважину более 3 л/с, а также в случае проходки часто переслаивающихся водоносных пластов и при проходке водонасыщенных песков мощностью более 5 м; возможность бурения лишь в устойчивых породах; ограничения глубины бурения до 300 м	Целесообразно применять при бурении в безводных районах и в многолетнемерзлых породах; при бурении на водоносные пласты с дебитом до 3 л/с; в устойчивых разрезах и при отсутствии в разрезе часто переслаивающихся водоносных пластов с большими водопритоками; при использовании погружных пневмоударников типа РП-130, РП-111 и др., в породах V—VIII категорий до глубины 150 м

Продолжение табл. 13

Способ бурения	Преимущества	Недостатки	Рекомендации по применению
Вращательный с обратной промывкой забоя	Высокие механические скорости бурения в мягких и рыхлых породах, превышающие аналогичные показатели при бурении с прямой промывкой до двух раз; высокое качество вскрытия продуктивного пласта; возможность бурения скважин большими диаметрами (до 1500 мм); бурение в породах с включениями гальки и гравия	Возможность бурения лишь в мягких и рыхлых породах I—IV категорий; ограниченность бурения скважин глубиной 200—300 м; бурение, возможно только в том случае, когда уровень подземных вод находится глубже 3 м	Следует применять при бурении в мягких и рыхлых породах до глубины 300 м; при необходимости создания мощного контура гравийной обсыпки и сооружении высокодебитных скважин
Ударно-канатный	Возможность качественного вскрытия и опробования пласта; отсутствие необходимости в снабжении установок водой и глиной; бурение в валунно-галечниковых отложениях, в породах, поглощающих промывочную жидкость, в многолетнемерзлых породах	Большой расход обсадных труб; более низкие, чем при вращательном бурении скорости бурения; ограниченность бурения скважин глубиной 150—200 м	Следует применять при бурении в малоизученных гидрогеологических разрезах, а также скважин глубиной до 200 м в породах, поглощающих промывочную жидкость, в валунно-галечниковых отложениях в многолетнемерзлых породах

прочность и предельно допустимые размеры проходных отверстий. Ниже приведены данные, характеризующие область применения различных фильтров, которыми оборудуются гидрогеологические скважины:

Водоносные породы	*Типы и конструкции фильтров*
Полускальные, неустойчивые, щебенистые и галечниковые (20—100 мм)*	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, каркасно-стержневые фильтры
Гравий, гравелистый песок с размером частиц от 1 до 10 мм (2—5 мм)	Трубчатые фильтры с круглой и щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки или штампованного стального листа; каркасно-стержневые фильтры с обмоткой проволокой из нержавеющей стали или с водоприемной поверхностью из штампованного листа
Пески крупные (1—2 мм)	Трубчатые фильтры с щелевой перфорацией, с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки или штампованного листа; каркасно-стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из проволочной обмотки или стального штампованного листа
Пески средние (0,25—0,5 мм)	Трубчатые и каркасно-стержневые фильтры с водоприемной поверхностью из сеток гладкого (галунного) плетения; трубчатые и каркасно-стержневые фильтры с однослойной гравийной обсыпкой (гравийные фильтры)
Пески мелкие (0,1—0,25 мм)	Трубчатые и каркасно-стержневые фильтры с одно- или двухслойной гравийной обсыпкой (гравийные фильтры); блочные фильтры

* В скобках даны преобладающие размеры для более, чем 50 % частиц (процент от общей массы породы).

Вопросы оборудования скважин фильтрами в каждом случае рассматриваются с учетом конкретных требований. Более подробная характеристика технологии проходки гидрогеологических скважин изложена в работах [1, 2].

Глава 12

ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ РАБОТЫ

ГРУППИРОВКА ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическим методом производится с использованием значений основных гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта: коэффициента фильтрации, проводимости пласта, коэффициентов уровне- и пьезопроводности и др.

При разведке некоторых месторождений, когда отмечается взаимосвязь подземных и поверхностных вод, необходимо иметь также значения таких параметров, как гидравлическое сопротивление русловых отложений реки Δl, коэффициент сопротивления заиленного слоя фильтрации A_0 (для оценки пропуск-

Таблица 14. Виды откачек и их назначение

Виды откачки	Назначение	Примерная продолжительность, сут	Стадия разведки
Пробные откачки (из поисковых, картировочных, наблюдательных и разведочных скважин)	Сравнительная оценка степени водообильности водоносных пород по величине удельного дебита или водопроводимости пласта; выделение участков, перспективных для постановки последующих разведочных работ	До 1	Главным образом, стадия поисковых гидрогеологических работ
Опытные откачки (из одиночных разведочных выработок)	Ориентировочное определение зависимости дебита и удельного дебита скважин от величины понижения уровня, а также приблизительная оценка водопроводимости, оценка запасов гидравлическим методом, выбор эксплуатационного дебита скважин	До 3	Предварительная и детальная разведки подземных вод
Кустовые откачки (из одной разведочной скважины с группой наблюдательных выработок)	Определение основных гидрогеологических параметров пород и граничных условий, оценка эксплуатационных запасов гидродинамическим методом, уточнение расчетных гидрогеологических параметров и граничных условий	До 20	Предварительная и детальная разведки
Групповые опытные откачки (из нескольких опытных (разведочных) скважин с группой наблюдательных выработок)	Изучение условий взаимосвязи водоносных горизонтов, определение основных гидрогеологических параметров пласта, опытное определение производительности части будущего водозабора	10—30	Предварительная и детальная разведки месторождений в зависимости от степени их гидрогеологической сложности
Опытно-эксплуатационные откачки (из группы разведочных скважин)	Количественная оценка опытным путем эксплуатационных запасов подземных вод	Определяется условиями каждого конкретного объекта	Детальная разведка только на месторождениях со сложными гидрогеологическими и гидрогеохимическими условиями

ной способности русла). На месторождениях, имеющих слоистое строение, необходимо также определять коэффициент перетекания B и в некоторых случаях коэффициент фильтрации и упругой водоотдачи слабопроницаемых разделяющих слоев.

Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек применительно к условиям разведки месторождений подземных вод подробно изложена в монографиях [5, 7, 24].

В настоящей главе рассматриваются только основные особенности, определяющие выбор методики проведения и обработки данных опытно-фильтрационных работ с целью определения гидрогеологических параметров водоносных пород. Опытные откачки в гидродинамическом отношении представляют собой искусственное возмущение фильтрационного потока путем принудительного отбора подземных вод из буровых скважин, колодцев или разведочных шахт. Анализ этого возмущения позволяет определить свойства горных пород, слагающих продуктивный горизонт (проницаемость, емкость пласта и др.). Существующие методы определения фильтрационных свойств горных пород основаны на использовании фундаментальных решений уравнений динамики подземных вод после существенных их упрощений — усреднения ряда входящих в них величин и линеаризации самих уравнений.

Откачки из буровых скважин в процессе поисков и разведки месторождений подземных вод являются одним из основных видов опытно-фильтрационных работ. По назначению их можно подразделить на пробные, опытные и опытно-эксплуатационные, что определяет методику их проведения, продолжительность и конструкции гидрогеологических скважин. В табл. 14 приведен перечень основных видов откачек, их назначение, продолжительность и стадия исследований, на которой они проводятся.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Расчетные параметры водоносных горизонтов определяются путем анализа данных опытных откачек и гидрогеологических условий опытного участка. По характеру формирования нарушенного режима уровней подземных вод в процессе опытно-фильтрационных работ можно выделить следующие типовые схемы водоносных пластов:

1) неограниченные в плане изолированные водоносные горизонты, условно обладающие относительно однородным распределением проницаемости: а) напорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях, изолированные в кровле и подошве; б) безнапорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях; в) напорные и безнапорные водоносные горизонты в трещиноватых породах;

2) водоносные горизонты в слоистых толщах с двухслойным и многослойным строением водоносной толщи;

3) ограниченные в плане водоносные горизонты: а) связанные с поверхностными водами; б) ограниченные в плане и разрезе непроницаемыми контурами; в) участки водоносных горизонтов с локальными очагами питания и разгрузки.

Для неограниченного в плане напорного водоносного горизонта в рыхлых породах снижение уровня во времени на некотором расстоянии от откачиваемой скважины описывается уравнением Тейса

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right)\right], \qquad (12.1)$$

где S — понижение напора в пласте на расстоянии r от опытной скважины через время t после начала откачки; Q — дебит опытной скважины; km — водопроводимость водоносного горизонта; E_i — символ интегральной показательной функции; a — коэффициент пьезопроводности.

С возрастанием времени аргумент функции E_i уменьшается, и при $r^2/(4at) \leqslant 0{,}1$ можно заменить ее логарифмом с погрешностью менее 7,8 % и записать уравнение (12.1) в логарифмической форме

$$S = \frac{0{,}183Q}{km}\lg\frac{2{,}25at}{r^2}. \qquad (12.2)$$

Начиная с того момента, когда интегральную показательную функцию можно заменить логарифмом, на опытном участке наступает квазистационарный режим фильтрации. При этом во всех точках области влияния (радиус r) опытных работ темп снижения уровня одинаков, т. е. кривая депрессии перемещается во времени как бы параллельно самой себе. Время наступления квазистационарного режима t_k и радиус зоны квазистационарного режима r_k называют контрольными и определяют по зависимостям:

$$t_k = 2{,}5r_k^2/a; \quad r_k = 1{,}58\sqrt{at_к}.$$

Уравнение (12.2) можно представить в виде уравнения прямой линии в координатах S—$\lg t$:

$$S = A + C\lg t, \qquad (12.3)$$

где

$$A = \frac{0{,}183Q}{km}\lg\frac{2{,}25}{r^2};$$

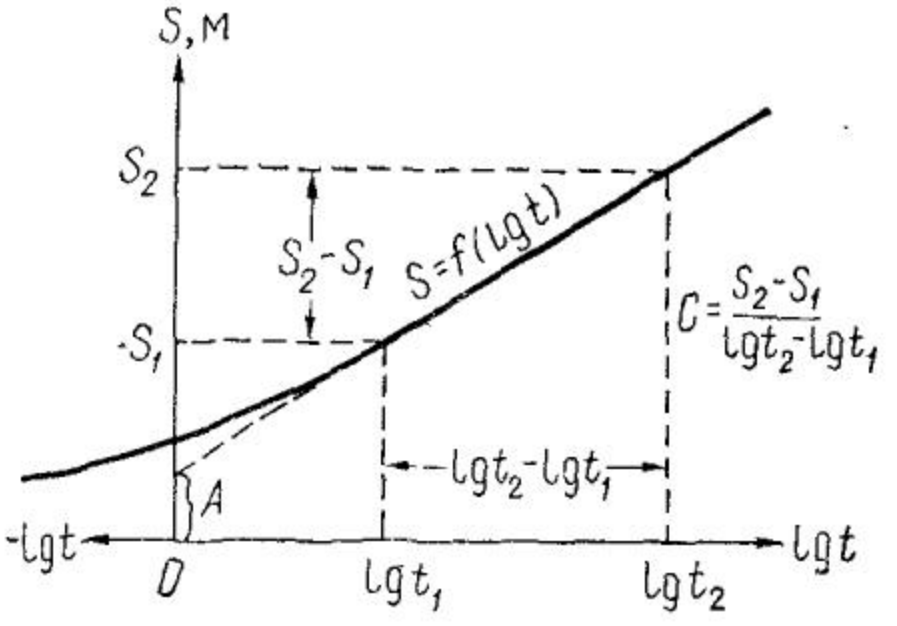


Рис. 27. График изменения уровня в процессе откачки из бесконечного напорного пласта в координатах S—$\lg t$

$$C = \frac{0{,}183Q}{km}.$$

Таким образом, определяя уклон графика $S - \lg t$, можно найти водопроводимость, а по отрезку, отсекаемому прямолинейной частью графика на оси ординат (рис. 27), и уклону — коэффициент пьезопроводности.

Аналогичные преобразования уравнения (12.2) можно выполнить и по отношению к расстоянию r или величине t/r^2. В результате будут получены выражения, отражающие линейную зависимость изменения уровня подземных вод от логарифма расстояния до опытной скважины или логарифма величины t/r^2 для зоны квазистационарного режима. По этим выражениям могут быть построены графики площадного и комбинированного прослеживания.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТНЫХ КУСТОВЫХ ОТКАЧЕК

Обработку материалов опытной откачки с постоянным дебитом обычно начинают в полевых условиях с построения графиков изменения уровня подземных вод в опытной и наблюдательной скважинах в координатах $S - \lg t$ (рис. 28).

На графике выделяется несколько участков: а) участок I для наблюдательных скважин соответствует начальным моментам откачки, когда еще не достигнут квазистационарный режим. Изменение уровня описывается функцией $-E_i(-u)$, $u = r^2/(4at)$; б) участок II соответствует квазистационарному режиму фильтрации. Темп снижения уровня зависит от свойств пород водоносного горизонта, влияние посторонних факторов (границ в плане, перетекания, неоднородности) еще не проявляется. При обработке графика можно пользоваться логарифмической зависимостью темпа снижения уровня во времени. В некоторых случаях участок II на графиках может отсутствовать (например, когда перетекание или влияние границ начинают проявляться сразу после начала откачки); в) участок III присутствует в тех случаях, когда график под влиянием ряда факторов может различным образом деформироваться. Характер этого участка графика несет информацию о граничных условиях водоносного горизонта в плане или в разрезе.

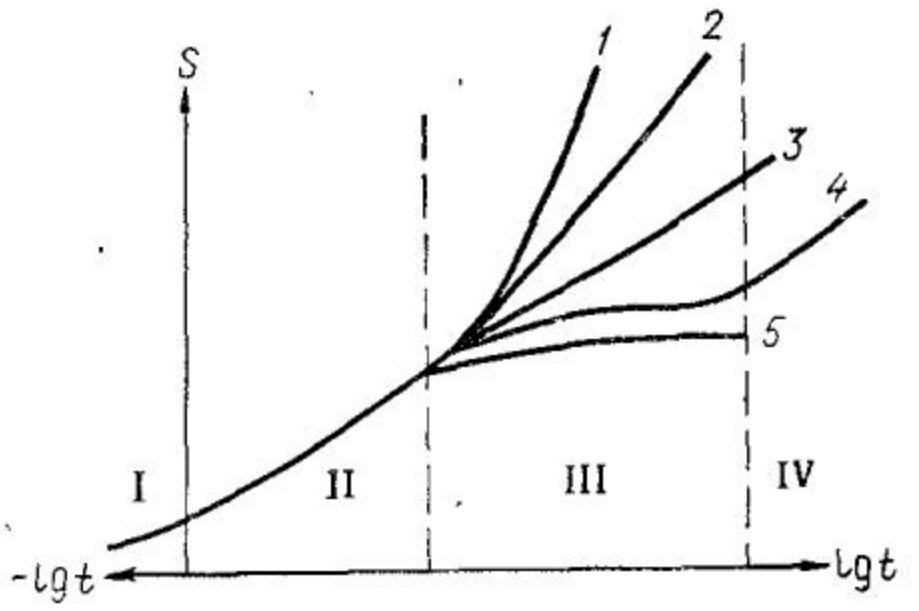


Рис. 28. Графики изменения уровня в процессе откачки в координатах S—$\lg t$ для различных схем.

1 — пласт-полоса с непроницаемыми границами; *2* — полуограниченный пласт с непроницаемой границей; *3* — неограниченный пласт; *4* — двухслойный пласт с двойной пористостью; *5* — полуограниченный пласт с контуром постоянного напора или с перетоком из пласта с постоянным напором

Если график прямолинеен и уклон его равен уклону на участке II (см. рис. 28, линия *1*), то пласт можно считать однородным и бесконечным (в пределах зоны влияния откачки). Если график прямолинеен, но уклон его отличается от уклона на участке II (линия *2*), то в пределах зоны влияния откачки имеется граница неоднородности. Линии *2* и *3* соответствуют случаям, когда проявляется влияние одной границы: линия *3* — контуру постоянного напора или перетеканию из смежного горизонта с постоянным напором, когда в процессе откачки наступает стабилизация; линия *2*, уклон которой в два раза больше уклона графика на участке I, — непроницаемой границе. Промежуточные положения прямолинейных графиков (пунктирные линии) свидетельствуют о влиянии границы пород иной проницаемости: выше линии *1* — худшей проницаемости, ниже линии *1* — более высокой проницаемости. Если оказывают влияние две и более непроницаемые границы, то график имеет вид кривой (см. рис. 28, линия *4*). Наконец, кривая *5* отражает влияние таких факторов, как двойная пористость, капиллярная кайма и слоистость толщи. При достаточной длительности откачки на графике может появиться прямолинейный участок IV, обычно имеющий уклон, равный уклону графика на участке II. Этот период откачки соответствует ситуации, когда определяются суммарные емкостные свойства всей толщи (либо дополнительное питание постоянной интенсивности).

Таким образом, характер графиков изменения уровня во времени в зависимости от цели анализа позволяет выбрать для обработки необходимый участок графика и соответствующую методику расчетов. Способы обработки данных откачек будут существенно различаться в зависимости от длительности опытной откачки, расстояния до наблюдательных скважин и необходимости учета дополнительных факторов, влияющих на ход откачки. На начальной стадии откачки, когда условие $r^2/4at \leqslant 0{,}1$ не соблюдается и построение графиков зависимости изменения уровня от логарифма времени или логарифма расстояния невозможно, следует использовать метод эталонной кривой или метод подбора.

Метод эталонной кривой был предложен Ч. Тейсом в 1935 г. Он состоит в наложении опытного графика снижения уровня в наблюдательной скважине, построенного в координатах $\lg S - \lg t$, на эталонную кривую $\lg[-E_i(-u)] - \lg(1/u)$, построенную в том же масштабе. Наложение осуществляется так, чтобы кривые совместились наибольшим числом точек при сохранении параллельности осей координат.

Логарифмирование уравнения (12.1) дает

$$\lg S = \lg \frac{Q}{4\pi km} + \lg[-E_i(-u)] \qquad (12.4)$$

при $u = r^2/4at$, откуда

$$\lg \frac{1}{u} = \lg t + \lg \frac{4a}{r^2}. \qquad (12.5)$$

Из формул (12.4) и (12.5) видно, что кривая опытных данных сдвинута по оси ординат по сравнению с эталонной кривой (рис. 29) на $\lg \frac{Q}{4\pi km}$, а по оси абсцисс на $\lg \frac{r^2}{4a}$, т. е.

$$\lg \frac{4a}{r^2} = \lg t \quad \text{при} \quad \lg \frac{1}{u} = 0 \quad \text{и}$$

$$\lg \frac{Q}{4\pi km} = \lg S \quad \text{при} \quad \lg [-E_i(-u)] = 0.$$

В практике разведочных работ этот метод используется редко, так как при проведении откачек стремятся обеспечить такую их длительность, при которой в зоне размещения всех или большинства наблюдательных скважин отмечается квазистационарный режим.

Иногда для упрощения расчетов используют соотношения понижений в наблюдательной скважине на два момента времени:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_1}\right)}{E_i\left(-\frac{r^2}{4at_2}\right)}, \qquad (12.6)$$

где t_1 и t_2 — время от начала откачки.

Коэффициент пьезопроводности определяют подбором, а затем подставляют в исходное уравнение типа (12.1) и находят водопроводимость. Для облегчения процедуры подбора В. М. Шестаковым предложены графики, а Э. А. Грикевич ре-

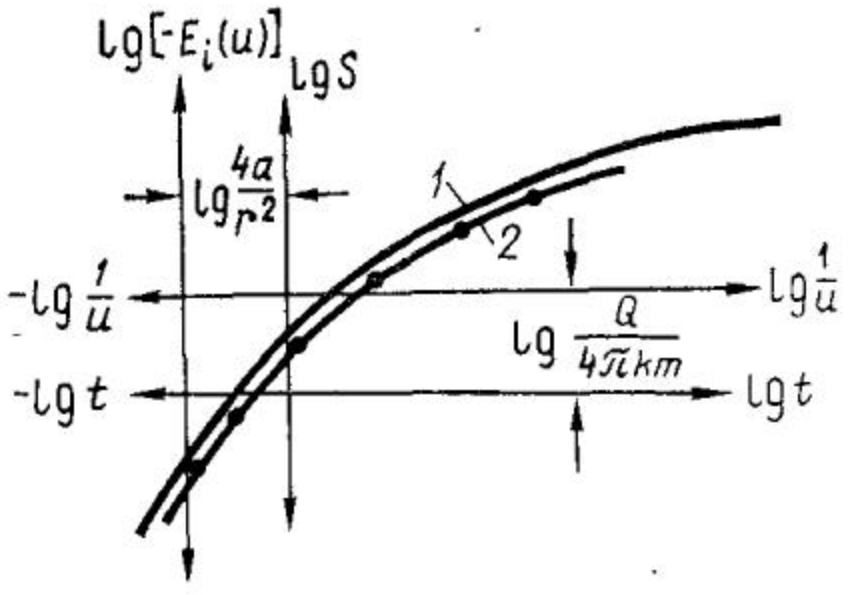


Рис. 29. Определение гидрогеологических параметров с помощью эталонной кривой.

1 — эталонная кривая; *2* — график $\lg S = f(\lg t)$

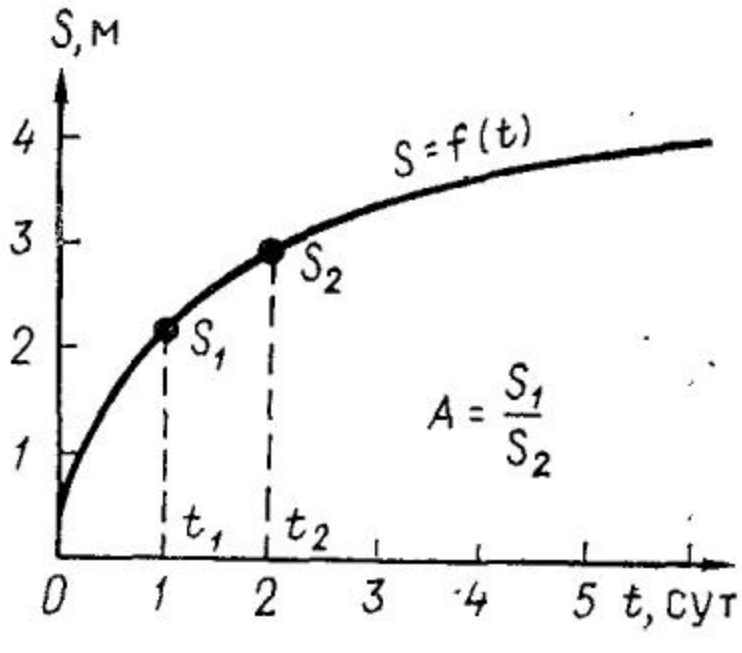


Рис. 30. Схема к определению гидрогеологических параметров по методу Э. А. Грикевича

комендует выбирать $t_2 = 2t_1$ (рис. 30). При этом соотношение понижений можно выразить формулой

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{E_i(-x)}{E_i\left(-\frac{x}{2}\right)} = A. \qquad (12.7)$$

Выражение (12.7) протабулировано, т. е. по значениям A находят x, коэффициент пьезопроводности, а затем и водопроводимость.

Методы, основанные на анализе уравнения (12.2). Как отмечалось, уравнение Тейса можно представить в виде уравнения прямой относительно $\lg t$, $\lg r$ и $\lg(t/r^2)$:

$$S = A_t + C_t \lg t; \quad A_t = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{2{,}25a}{r^2}; \quad C_t = \frac{0{,}183Q}{km}; \qquad (12.8)$$

$$S = A_r + C_r \lg r; \quad A_r = \frac{0{,}183Q}{km} \lg 2{,}25at;$$

$$C_r = \frac{0{,}366Q}{km}; \qquad (12.9)$$

$$S = A_к + C_к \lg \frac{t}{r^2}; \quad A_к = \frac{0{,}183Q}{km} \lg 2{,}25a;$$

$$C_к = \frac{0{,}183Q}{km}. \qquad (12.10)$$

Методы определения гидрогеологических параметров с использованием зависимостей (12.8) — (12.10) можно назвать методами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания изменения уровня (рис. 31). Для этого по данным кустовой откачки строятся графики изменения уровня воды во времени, по площади (для нескольких наблюдательных скважин на фиксированные моменты времени) или комбинированные графики в координатах $S - \lg(t/r^2)$. На графиках временно́го и площадного прослеживания имеются прямолинейные участки, продолжение которых до оси ординат отсекает на ней отрезки A_t и A_r (уклоны прямолинейных участков C_t и C_r). Графики в координатах $S - \lg(t/r^2)$ строятся для нескольких наблюдательных скважин. По прошествии некоторого времени они выходят на общую асимптотическую прямую, а при откачках из трещиноватых пород могут выходить на параллельные асимптотические прямые с уклоном $C_к$. Продолжение прямолинейного участка графика отсекает на оси ординат отрезок $A_к$ (см. рис. 31, *в*). По уклонам графиков C_t, C_r и $C_к$ определяют значения водопроводимости пласта, а по значениям A_t, A_r и $A_к$ и укло-

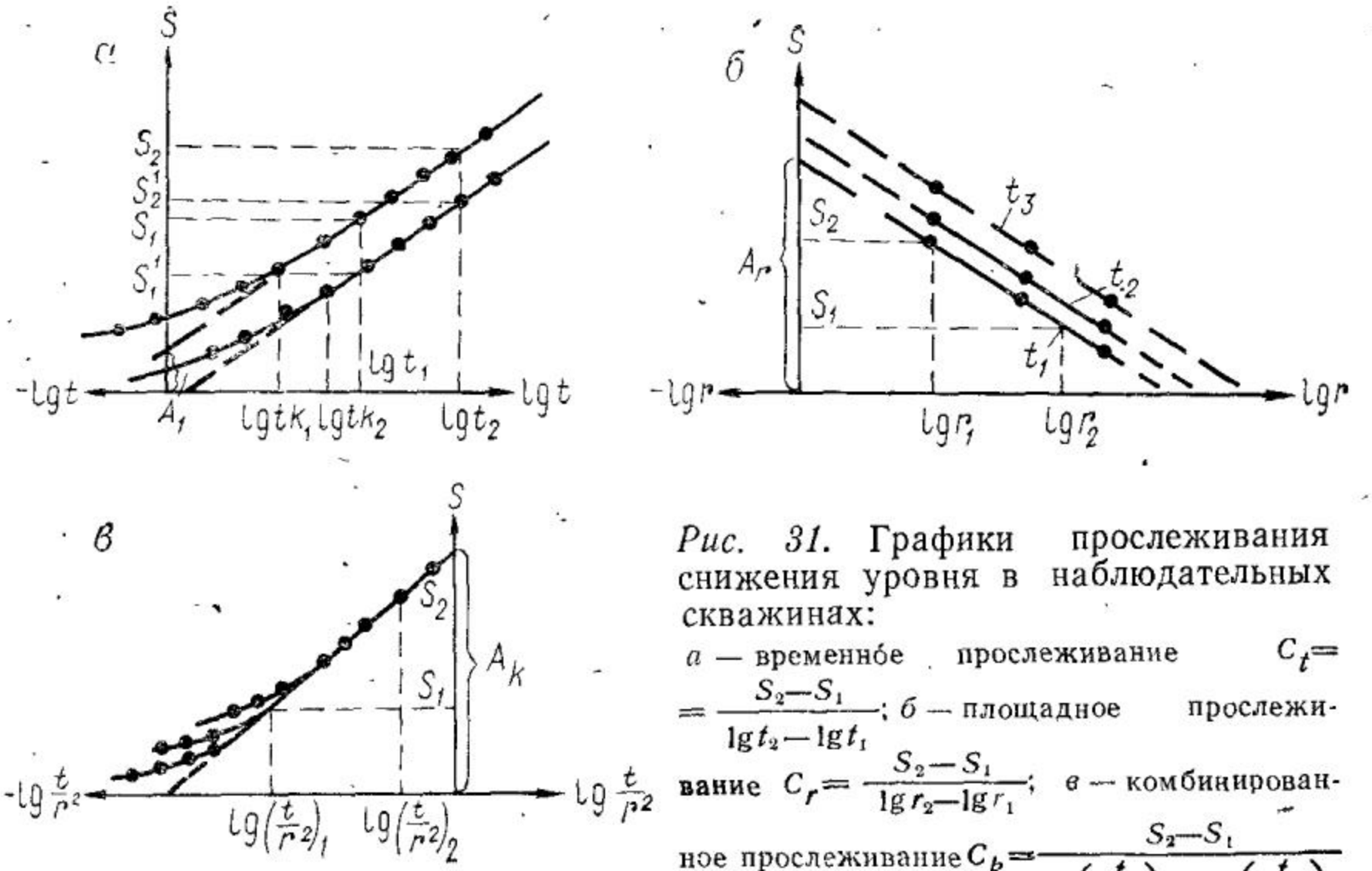


Рис. 31. График прослеживания снижения уровня в наблюдательных скважинах:

а — временнóе прослеживание $C_t = \frac{S_2-S_1}{\lg t_2-\lg t_1}$; *б* — площадное прослеживание $C_r = \frac{S_2-S_1}{\lg r_2-\lg r_1}$; *в* — комбинированное прослеживание $C_k = \frac{S_2-S_1}{\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_2-\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_1}$

нам — коэффициент пьезопроводности:

$$km = \frac{0,183Q}{C_t}; \qquad \lg\alpha = \frac{A_t}{C_t} + 2\lg r - 0,35; \qquad (12.11)$$

$$km = \frac{0,366Q}{C_r}; \qquad \lg a = \frac{2A_r}{C_r} - \lg t - 0,35; \qquad (12.12)$$

$$km = \frac{0,183Q}{C_к}; \qquad \lg\alpha = \frac{A_к}{C_к} - 0,35. \qquad (12.13)$$

Необходимыми и достаточными условиями достоверности значений гидрогеологических параметров, определяемых указанными способами, являются: 1) параллельность прямолинейных участков графиков временнóго прослеживания для разноудаленных от опытной выработки наблюдательных скважин; 2) параллельность прямолинейных участков графиков площадного прослеживания, построенных для разных моментов времени; 3) выход на общую асимптоту или параллельность прямолинейных участков графиков комбинированного прослеживания (для трещиноватых пород).

Метод сложения течений. Учет влияния границ. Для .учета влияния границ фильтрационного потока в плане и взаимодействия скважин, а также обработки данных о восстановлении уровня после остановки опытной откачки используется принцип сложения течений или суперпозиции. Согласно этому принципу понижение уровня в любой точке пласта

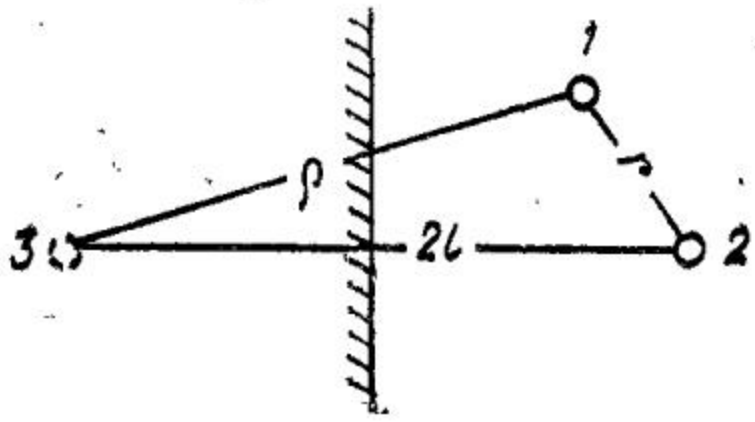


Рис. 32. Схема к учету одной прямолинейной границы пласта

Скважины: *1* — наблюдательная; *2* — центральная; *3* — воображаемая

равно алгебраической сумме понижений от всех взаимодействующих скважин.

При наличии на опытном участке одной прямолинейной границы в плане предполагается, что по другую сторону границы на таком же расстоянии от нее, как и реальная скважина, находится воображаемая скважина (рис. 32). Если граница непроницаема, то считают, что воображаемая скважина эксплуатируется с таким же дебитом, что и реальная. В случае границы с постоянным напором (река, озеро) воображаемая скважина работает как нагнетательная выработка с производительностью, равной дебиту опытной скважины.

Уравнение (12.2) модифицируется следующим образом:

1) для непроницаемой в плане границы

$$S = \frac{0,183Q}{km}\lg\frac{2,25at}{r^2} + \frac{0,183Q}{km}\lg\frac{2,25at}{\rho^2} = \frac{0,366Q}{km}\lg\frac{2,25at}{r\rho}; \qquad (12.14)$$

2) для границы с постоянным напором

$$S = \frac{0,183Q}{km}\lg\frac{2,25at}{r^2} - \frac{0,183Q}{km}\lg\frac{2,25at}{\rho^2} = \frac{0,366}{km}\lg\frac{\rho}{r}, \qquad (12.15)$$

где ρ — расстояние от наблюдательной скважины до отраженной относительно границы центральной.

Иначе говоря, в случае непроницаемой границы пласта режим снижения уровня в наблюдательных скважинах при опытных откачках будет неустановившимся, а уклон прямолинейного графика S—$\lg t$ при $t_к \geqslant (2,5\rho^2/a)$ будет вдвое больше, чем в неограниченном пласте. В случае границы с постоянным напором (река, озеро, канал) по прошествии некоторого времени от начала откачки наступает стабилизация уровня, а абсолютная величина его понижения зависит от водопроводимости и размещения центральной и наблюдательной скважин относительно границы. Иногда метод учета границ пласта с помощью воображаемых скважин называют *методом зеркальных отображений*.

С использованием метода сложения течений выполняют и обработку данных групповых откачек. Конечное уравнение приводится к виду (12.2), но используется приведенное расстояние

от наблюдательной скважины и приведенное время в случаях, когда опытные скважины вступают в работу не одновременно.

Принцип сложения течений может быть использован для обработки данных откачек со ступенчатым изменением дебита опытных скважин. Если в течение некоторого времени t_1 дебит центральной скважины был Q_1, а затем изменился до Q_2 (рис. 33), то понижение уровня на отрезке времени $t—t_1$ будет описываться зависимостью

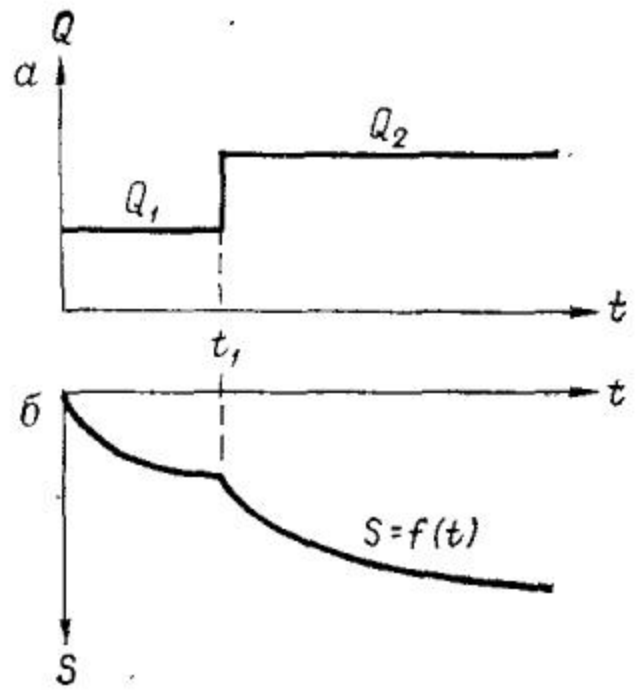


Рис. 33. Графики изменения дебита *(а)* и уровня *(б)* в наблюдательной скважине

$$S = \frac{0,183Q_1}{km} \lg \frac{2,25t}{r^2} + \frac{0,183(Q_2 - Q_1)}{km} \lg \frac{2,25a(t-t_1)}{r^2}. \quad (12.16)$$

Уравнение (12.16) означает, что скважина работает с дебитом Q_1, а в момент времени t_1 в этом же месте включается новая скважина, работающая с дебитом $(Q_2—Q_1)$.

После упрощения получаем:

$$S = \frac{0,183Q_2}{km} \lg \frac{2,25at_{пр}}{r^2}, \quad (12.17)$$

где $\lg t_{пр} = \alpha \lg t + (1-\alpha) \lg (t-t_1)$; $\alpha = Q_1/Q_2$.

Таким образом, для обработки данных такой откачки могут быть использованы методы временно́го, площадного и комбинированного прослеживания при соблюдении условия $[r^2/4a(t—t_1)] \leqslant 0,1$ для самой удаленной наблюдательной скважины. Не представляет труда использование этого метода и для большего числа ступеней дебита.

Определение гидрогеологических параметров для других видов изменения дебита (линейного, параболического, экспоненциального) здесь не рассматривается, поскольку предполагается, что обеспечение постоянства дебита является задачей проектирования и проведения опытных работ. В случае, если изменение дебита по указанным зависимостям все же имело место, обработку данных откачки можно провести, используя решения, приведенные в ряде опубликованных работ [5, 24].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТА ПО ДАННЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УРОВНЯ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ОТКАЧКИ

Используя принцип сложения течений, остановку откачки можно представить как включение нагнетательной скважины на месте работающей центральной. Производительность нагнетающей и откачивающей скважин одинакова. Такой прием позволяет учесть безвозвратное извлечение воды из пласта в ходе от-

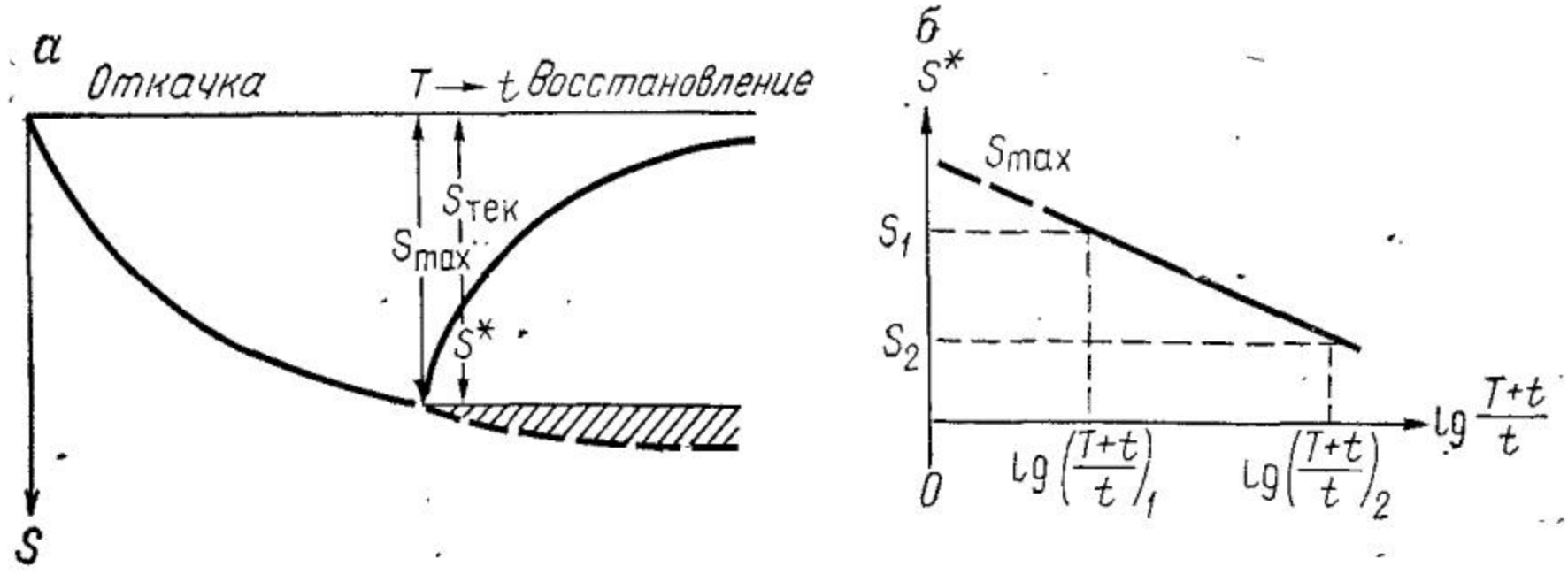


Рис. 34. Графики изменения уровня в наблюдательной скважине после остановок откачки (*а*) и восстановления уровня (*б*) в координатах S^*—$\lg\frac{T+t}{t}$.

T — продолжительность откачки; t — текущее время восстановления; S_{max} — максимальное понижение на конец откачки; $S_{тек}$ — текущее понижение уровня в процессе восстановления; S^* — восстановление уровня от динамического, достигнутого на конец откачки. $C_t = \frac{S_2 - S_1}{\lg\left(\frac{T+t}{t}\right)_2 - \lg\left(\frac{T+t}{t}\right)_1}$.

качки. Тогда процесс восстановления уровня можно описать следующей зависимостью:

$$S = \frac{0,183Q}{km}\lg\frac{(T+t)}{t}, \qquad (12.18)$$

где T — продолжительность откачки; t — время, прошедшее после остановки откачки.

Величина понижения в формуле (12.18) представляет собой текущее понижение уровня от статического (рис. 34), но чаще бывает удобнее пользоваться величиной восстановления уровня от динамического на конец откачки.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТКАЧЕК В СЛОИСТЫХ ТОЛЩАХ

Откачка в условиях постоянного напора в верхнем пласте. Обработка данных опытных откачек в слоистых толщах разработана лишь для относительно простых схем. Из них простейшей является схема из двух водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемым прослоем (рис. 35, *а*). Нижний водоносный горизонт подстилается водоупором, а в верхнем горизонте поддерживается постоянный напор. При отборе воды из нижнего горизонта происходит перетекание из верхнего горизонта через разделяющий слой. Предполагается, что в эксплуатируемом нижнем водоносном горизонте движение воды преимущественно горизонтальное, а в разделяющем слое — только вертикальное, т. е. происходит по схеме Мятиева — Гиринского. В большинстве случаев запасами воды в разделяющем слое,

особенно при небольшой его мощности, можно пренебречь и характеризовать его коэффициентом перетекания $A=k_0/m_0$ (где k_0 и m_0 — вертикальный коэффициент фильтрации и мощность разделяющего слоя). В такой постановке разделяющая толща рассматривается как пленка, характеризующаяся параметром k_0/m_0. Решение для этой схемы и способы определения гидрогеологических параметров по данным откачек предложены М. С. Хантушем. Снижение уровня в наблюдательной скважине описывается зависимостью

$$S=\frac{Q}{4\pi km}W\left(u,\ \frac{r}{B}\right), \qquad (12.19)$$

где $u=r^2/(4at)$; $B=\sqrt{kmm_0/k_0}$ (здесь r — расстояние между центральной и наблюдательной скважинами; km и a — водопроводимость и коэффициент пьезопроводности опробуемого нижнего пласта; t — время от начала откачки; M_0 и k_0 — мощность и коэффициент фильтрации разделяющего слоя).

Величину B называют фактором перетекания, она имеет размерность длины и является некоторым эквивалентом радиуса области питания. График изменения уровня в наблюдательной скважине показан на рис. 35, *б*. В начальный период времени изменение уровня имеет неустановившийся характер, но постепенно наступает стабилизация. Для понижения уровня на период стабилизации справедлива зависимость

$$S_m=\frac{Q}{2\pi km}K_0\left(\frac{r}{B}\right), \qquad (12.20)$$

где K_0 — функция Бесселя нулевого порядка второго рода.

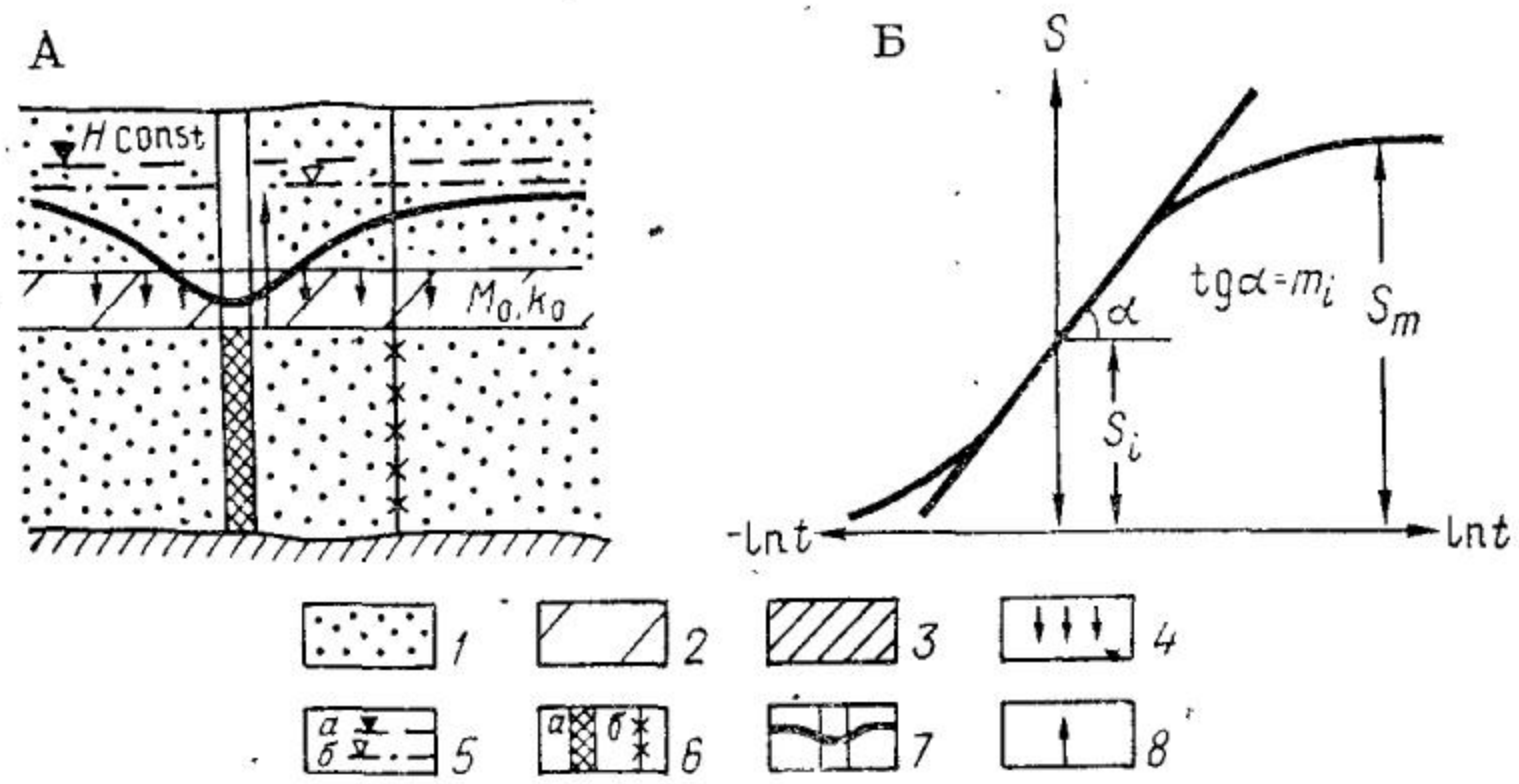


Рис. 35. Схема откачки в слоистой толще с двумя водоносными горизонтами, разделенными слабопроницаемым прослоем.

А — разрез; Б — график изменения уровня в наблюдательной скважине. *1* — пески; *2* — слабопроницаемые породы; *3* — водоупорные породы; *4* — направление перетока; *5* — статический уровень в верхнем *(а)* и нижнем *(б)* водоносных горизонтах; *6* — фильтры в центральной *(а)* и наблюдательной *(б)* скважинах; *7* — депрессионная воронка нижнего водоносного горизонта; *8* — напор

М. С. Хантуш в 1960 г. предложил следующий порядок обработки данных откачки: 1) строят график изменения уровня в наблюдательной скважине в координатах $S - \ln t$; 2) находят величину максимального понижения S_m непосредственно по графику или путем его экстраполяции; 3) определяют величину S_i соответствующую точке перегиба графика; величина S должна быть равна 0,5 S_m; 4) находят время t_i в точке перегиба; 5) определяют уклон графика в точке перегиба m_i; 6) для точки перегиба выполняется соотношение $S_i/m_i = e^{r/B} \cdot K_0(r/B)$, поэтому по соответствующим таблицам [5, 24] по значению S_i/m_i находят r/B и B (для известного r), а также K_0 (r/B); 7) находят km, подставляя K_0 (r/B) в выражение (12.21); 8) при известном значении B находят коэффициент пьезопроводности a из выражения $r^2/(4at_i) = r/2B$, откуда $a = rB/(2t_i)$; 9) из выражения $B = \sqrt{kmm_0/k_0}$ при известных B и km находят коэффициент перетекания $k_0/m_0 = km/B^2$ или коэффициент фильтрации раздельного слоя при известном m_0: $k_0 = kmm_0/B^2$.

Интересной особенностью откачек в условиях описываемой схемы является то, что уклоны графиков в точках перегиба (наклоны прямолинейных участков графиков, построенных в координатах $S - \ln t$) для разноудаленных скважин различны и уменьшаются с ростом расстояния до наблюдательной скважины.

При малом значении аргумента функции Бесселя можно аппроксимировать логарифмом. При $r/B < 0{,}3$ с погрешностью не более 2,7 % K_0 $(r/B) \approx \ln(1{,}12\ B/r)$ выражение (12.20) приобретает вид

$$S = \frac{0{,}366Q}{km} \lg \frac{1{,}12B}{r}, \qquad (12.21)$$

т. е. величину $1{,}12B$ можно рассматривать как условный радиус круговой области питания.

При наличии двух наблюдательных скважин для условий установившегося режима фильтрации водопроводимость можно определять методом подбора по соотношению понижений уровня в двух наблюдательных скважинах

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{K_0(r_1/B)}{K_0(r_2/B)}, \qquad (12.22)$$

откуда подбором находят B, а подставляя $K_0(r_1/B)$ в уравнение (12.21), вычисляют $km = \dfrac{Q}{2\pi S_m} K_0(r_1/B)$.

В некоторой области вокруг опытной скважины, где функцию Бесселя можно заменить на логарифм (при $r/B \leqslant 0{,}3$), депрессионная воронка имеет обычную логарифмическую форму и для определения величины водопроводимости по двум наблю-

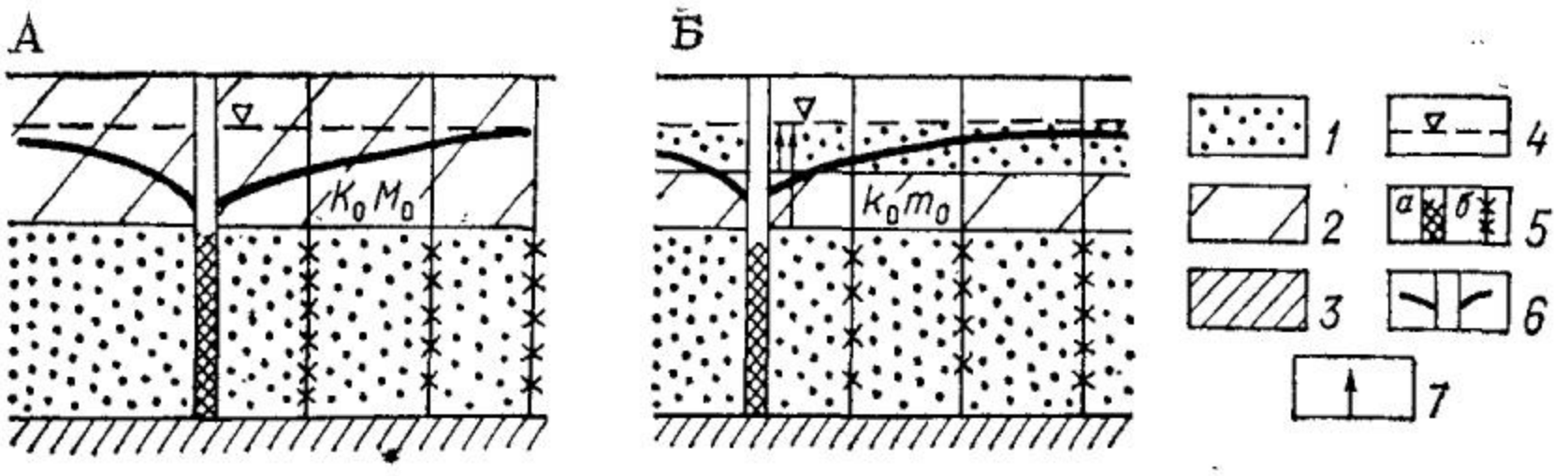


Рис. 36. Схемы откачек в двухслойной (А) и трехслойной (Б) толщах.

1 — пески; *2* — слабопроницаемые породы; *3* — водоупорное осиование; *4* — статический уровень подземных вод; *5* — фильтры в центральной *(а)* и наблюдательной *(б)* скважинах; *6* — депрессионная воронка; *7* — напор. K_0, κ_0 — коэффициенты фильтрации покровных образований и разделяющего слоя; M_0 — водоотдача покровных отложений; m_0 — мощность разделяющего слоя

дательным скважинам можно воспользоваться формулой Дюпюи

$$S_1 - S_2 = \Delta S = \frac{0{,}366Q}{km} \lg \frac{r_2}{r_1},$$

откуда

$$km = \frac{0{,}366Q}{\Delta S} \lg \frac{r_2}{r_1}. \qquad (12.23)$$

Откачка в условиях изменяющегося напора в верхнем пласте. Эта схема реализуется в природе как двухслойный пласт, когда основной водоносный горизонт перекрыт толщей пород меньшей проницаемости (рис. 36, *а*). При откачке из основного пласта происходит осушение верхнего слоя, имеющего гравитационную водоотдачу, на два-три порядка превышающую упругую водоотдачу основного горизонта. Такая же схема используется и при рассмотрении двух водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемым слоем, когда в верхнем водоносном горизонте уровень снижается под влиянием отбора воды из нижнего горизонта (см. рис. 36, *б*). Приближенный способ обработки откачки в условиях двухслойной толщи предложен В. А. Мироненко и Л. М. Сердюковым.

Более сложная методика расчетов гидрогеологических параметров в двухслойной среде, требующая как минимум трех наблюдательных скважин, разработана Н. З. Моркосом и Д. А. Манукьяном.

Характерной особенностью графиков изменения уровня при откачке из скважины в двухслойной среде является наличие участков выполаживания, или ложной стабилизации. На приведенном на рис. 37 графике можно выделить четыре участка: а) участок I, когда водоносный горизонт «работает» как изолированный напорный пласт. Режим еще не квазистационарный, т. е. $r^2/(4at) > 0{,}1$, и логарифмической зависимостью

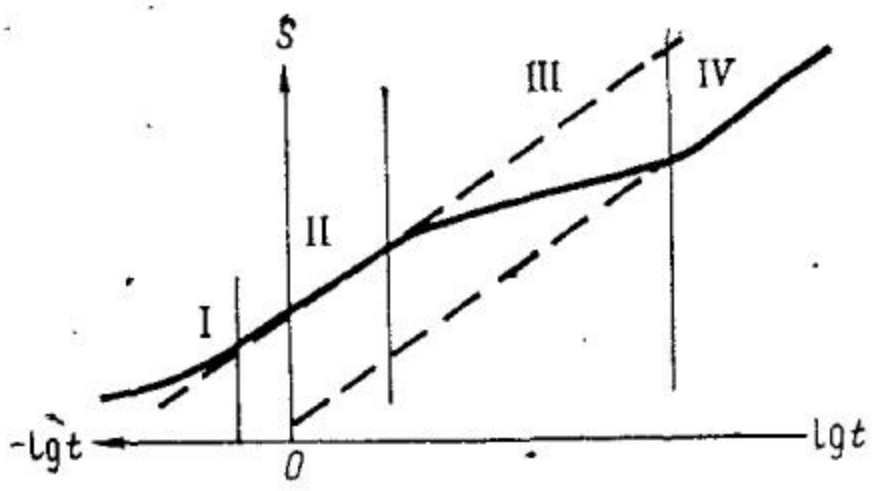


Рис. 37. График снижения уровня в наблюдательной скважине при откачке в условиях двухслойной толщи

пользоваться нельзя; б) участок II — водоносный горизонт «работает» как изолированный напорный пласт, режим квазистационарный, перетекание еще не сказалось, прямолинейный участок графика позволяет определить водопроводимость водоносного горизонта и упругую водоотдачу пласта (или коэффициент пьезопроводности); в) переходный участок III, иногда «ложная стабилизация» за счет перетекания, что эквивалентно росту величины водоотдачи, темп снижения уровня замедляется; г) второй прямолинейный участок IV, соответствующий квазистационарному режиму в системе «водоносный горизонт — перекрывающая водонасыщенная толща»; уклон прямой такой же, как и для участка II, но водоотдача суммарная (упругая — нижнего горизонта и гравитационная — верхнего), темпы снижения уровня в основном горизонте и в перекрывающей толще одинаковы.

Время наступления квазистационарного режима IV участка определяется условием $t > 5\mu^* h_0/k_0$ (где μ^* — упругая водоотдача нижнего водоносного горизонта; h_0 — мощность верхнего слоя; k_0 — коэффициент фильтрации). Полагая, что $k_0 = 0{,}01$ м/сут, $h_0 = 10$ м и $\mu^* = 10^{-3}$, получаем $t = 5$ сут; при $\mu^* = 10^{-4}$, $t = 50$ сут; при $\mu^* = 10^{-4}$ и $k_0 = 0{,}001$ м/сут $t = 500$ сут. Иначе говоря, при малой величине упругой водоотдачи достичь получения представительных участков графиков удается далеко не всегда. При $k_0 = 10^{-3}$ м/сут обычно не удается определить фильтрационные и емкостные свойства перекрывающего водонасыщенного слоя при практикуемой длительности откачек.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОТКАЧЕК ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Опытные кустовые откачки могут проводиться и для определения расстояния до непроницаемых границ или степени связи подземных вод с поверхностными. Последний вопрос часто является решающим в выборе схемы водозабора, его конструктивных особенностей, возможной производительности и т. д.

Откачки вблизи рек и водоемов обычно преследуют двойную цель — определение гидрогеологических параметров водоносного горизонта и выявление связи подземных и поверхностных вод. В условиях широких рек или озер степень связи подземных и поверхностных вод характеризуют величиной Δl — эквивалентным удлинением при фильтрации за счет гидравлического сопротивления русловых отложений и искрив-

ления пути фильтрации. Величина Δl зависит от соотношения коэффициента фильтрации русловых отложений и пород основного пласта: чем меньше это отношение, тем больше величина Δl. Известно несколько способов ее определения: по данным наблюдений за режимом уровней в период прохождения в реке паводка и за естественным режимом уровней в период межени, по соотношению уровней в луче скважин, направленном к реке, и т. д.

При разведке подземных вод рекомендуется сооружение специальных кустов вблизи рек. В относительно простых условиях при однородном строении толщи аллювиальных отложений небольшой мощности (до 20 м) рекомендуется закладывать двухлучевые кусты с лучом, параллельным реке и перпендикулярным к ней. Лучи должны содержать не менее двух наблюдательных скважин (рис. 38). По параллельному реке лучу можно определить коэффициент фильтрации по формуле Дюпюи.

Ниже приведены два способа определения Δl по данным откачек. 1. Если величина водопроводимости определена по скв. 1 и 2 (см. рис. 38), то по скв. 3 можно определить величину из выражения

$$S_3 = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2(l+\Delta l) - r_3}{r_3}, \qquad (12.24)$$

аналогично устанавливается Δl для скв. 4. Величину Δl можно найти подбором или рассчитать непосредственно по формуле

$$\Delta l = \frac{1}{2}\left[r_3 e^{\frac{2\pi km S_3}{Q}} - (2l - r_3)\right]. \qquad (12.25)$$

При этом должно соблюдаться условие $l - r_3 \geqslant r_3$. 2. Если понижение уровня при откачке превышает 15 % мощности водоносного горизонта, т. е. когда уменьшением водопроводимости пласта за счет изменения мощности пренебречь нельзя, формулы (12.24) и (12.25) приобретают вид:

$$(2H - S_3) S_3 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{2(l+\Delta l) - r_3}{r_3}, \qquad (12.26)$$

$$\Delta l = \frac{1}{2}\left[r_3 e^{\frac{2\pi k (2H - S_3) S_3}{Q}} - (2l - r_3)\right], \qquad (12.27)$$

где H — первоначальная мощность безнапорного водоносного горизонта.

Аналогичные расчеты по наблюдательной скважине *4* служат для контроля и должны давать близкие результаты.

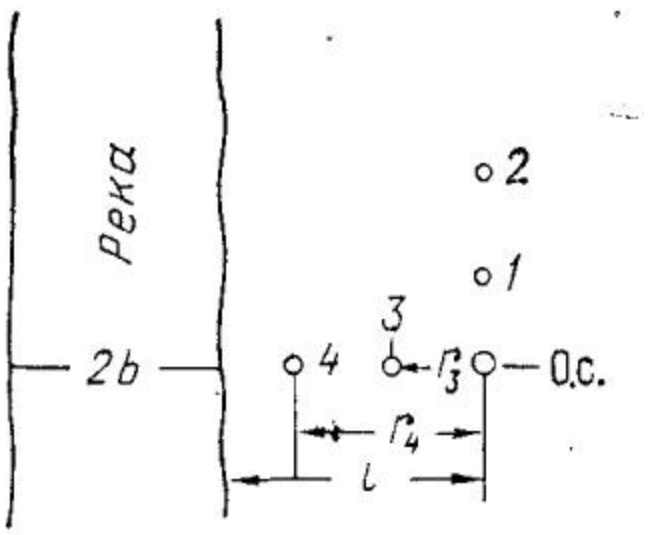


Рис. 38. Схема куста у реки

О.с. — опытные скважины; *1, 2, 3, 4* — наблюдательные скважины. r_3=20 м; r_4=50 м

Величину Δl можно определить по соотношению понижений в наблюдательных скважинах. Этот метод предложен Е. Л. Минкиным в 1972 г. Если величина km неизвестна, то отношение понижений уровня в скважинах на луче, перпендикулярном к реке, составит

$$\alpha = \frac{S_3}{S_4} = \frac{\ln \dfrac{2(l+\Delta l)-r_3}{r_3}}{\ln \dfrac{2(l+\Delta l)-r_4}{r_4}}. \qquad (12.28)$$

Е. Л. Минкин предложил строить график в координатах $\alpha - (l+\Delta l)$, задаваясь величиной $(l+\Delta l)$ для фактических r_3 и r_4 (рис. 39). По графику для фактического отношения S_3/S_4 находят расчетное значение $l+\Delta l$ и вычисляют Δl. Если понижение в скв. 3 превышает 15 % мощности водоносного горизонта, то вместо отношения S_3/S_4 следует использовать отношение $(2H-S_3)S_3/(2H-S_4)S_4$.

Наличие двух лучей с двумя наблюдательными скважинами в каждом (параллельно реке и перпендикулярно к ней) позволяет выполнить контроль расчетов по данному методу и предыдущему.

Практика разведочных работ в речных долинах показывает, что иногда можно принять следующие приближенные значения: 1) 50—100 м, когда река прорезает водоносный горизонт в трещиноватых и закарстованных породах; 2) 150—200 м — для водоносных горизонтов в песчано-гравийно-галечниковых отложениях; 3) 400—500 м — когда основной водоносный горизонт отделен от реки слабопроницаемым слоем или другим водоносным горизонтом с относительно низкими фильтрационными свойствами; 4) более 500 м (иногда до 3000 м) — для водоносных горизонтов в районах водохранилищ.

Оценка коэффициента сопротивления заиленного слоя фильтрации. В ряде случаев, когда ширина реки небольшая и депрессия может распространяться на другой берег, характеристики связи подземных и поверхностных вод в виде величины Δl недостаточно. Приходится определять пропускную способность русла и сравнивать ее с намечаемым водоотбором. Эту проверку проводят посредством величины A_0, названной В. М. Григорьевым коэффициентом сопротивления заиленного слоя фильтрации $A_0 = m_0/k_0$ (где m_0 и k_0 — мощность и коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя под руслом реки). По данным В. М. Григорьева, ориентировочные значения A_0 составляют: для горных рек 5—10 сут, для равнинных рек 10—15 сут, для небольших зарегулированных рек 20—30 сут. Непосредственное определение A_0 затруднительно, поскольку обычно неизвестно значение k_0. Величина A_0 связана с Δl следующей зависимостью

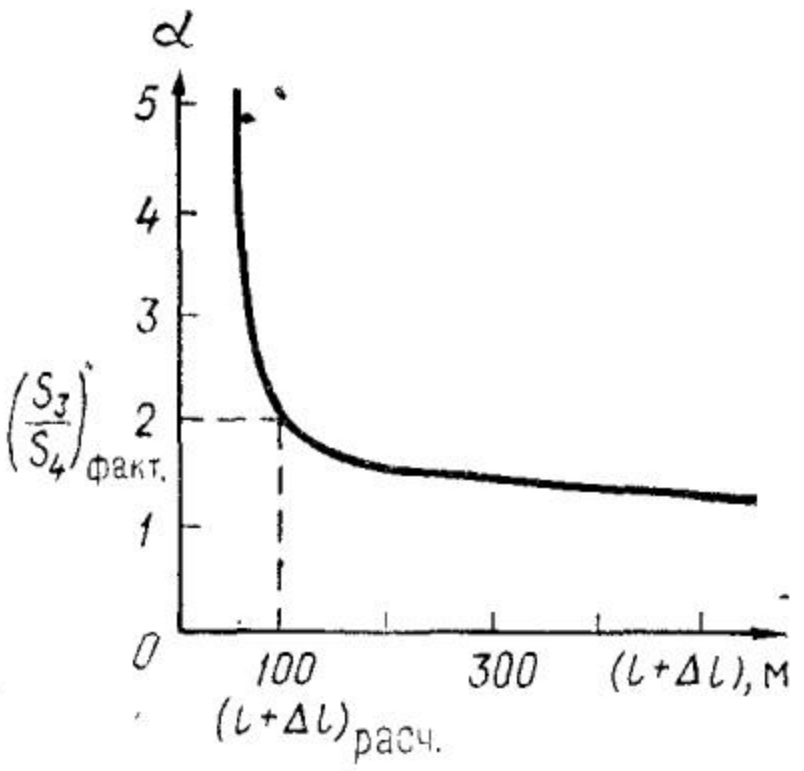


Рис. 39. График зависимости α — $-(l+\Delta l)$ (по Е. Л. Минкину)

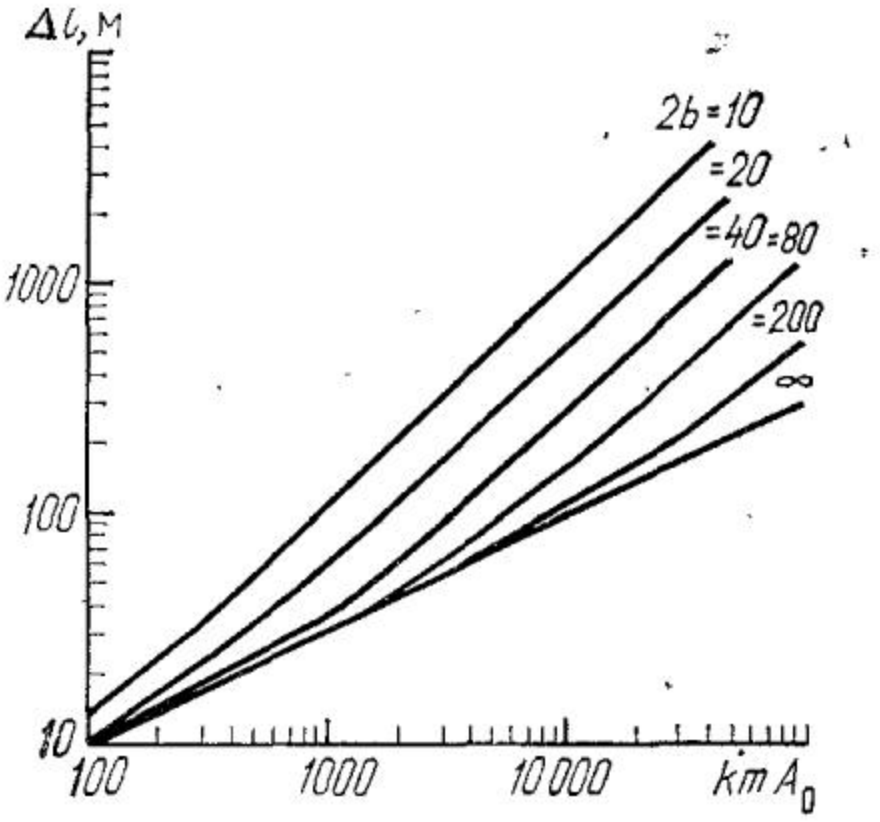


Рис. 40. График зависимости $\Delta l_м$ — $-kmA_0$ для разных значений b (по Е. Л. Минкину)

$$\Delta l = \sqrt{kmA_0}\,\mathrm{cth}\,\frac{2b}{\sqrt{kmA_0}}, \qquad (12.29)$$

где $2b$ — ширина реки.

Если величины km и Δl определены указанным выше способом, то значение A_0 можно найти подбором из выражения (12.29) или с помощью графиков зависимости $\Delta l - kmA_0$ (рис. 40). При $b/\sqrt{kmA_0} > 3$ влиянием ширины реки можно пренебречь и формула (12.29) упрощается

$$\Delta l = \sqrt{kmA_0}. \qquad (12.30)$$

Надо отметить, что указанное ограничение является довольно жестким. Так, для равнинной реки при $A_0 = 10$ сут и $km = 500$ м²/сут пользоваться формулой 12.30 можно лишь при ширине реки более 420 м.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ БЕЗНАПОРНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ И В ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРИЗОНТАХ

Рассмотренные выше графоаналитические методы обработки результатов опытных работ применимы для исследования напорных водоносных горизонтов, мощность и водоотдача которых в процессе откачки постоянны. В безнапорных водоносных горизонтах снижение уровня в процессе откачек ведет к уменьшению мощности и, соответственно, водопроводимости водоносного горизонта. Таким изменением мощности безнапорного горизонта при опытных работах можно пренебречь, если величина понижения уровня к концу опытных откачек не будет превышать 20 % от общей мощности водоносного горизонта и

для обработки откачек используются формулы для напорных вод. При понижении уровня более чем на 20 % мощности водоносного горизонта следует на графиках вместо понижения откладывать величину $(2H - S)S$. В остальном обработка материалов откачек выполняется так же, как и для напорных пластов.

Изменения уровня подземных вод в опытной и наблюдательной скважинах в процессе проведения опытно-фильтрационных работ могут иметь различный характер. Установлено, что в ряде случаев при опробовании безнапорных водоносных горизонтов происходит деформация графиков изменения уровня во времени в связи с проявлением эффекта Болтона (запаздывание реакции изменения уровня во времени). Для описания этого явления Болтоном эмпирически принято изменение водоотдачи во времени. На графиках $S - \lg t$ в общем случае выделяются три участка, как и в случае двухслойной толщи: а) первый участок отвечает условиям уравнения Тейса при упругом режиме; б) второй участок — ложностационарного режима характеризуется замедлением снижения динамического уровня; в) третий участок по своему режиму отвечает уравнению Тейса — Джейкоба для гравитационной водоотдачи.

Для обработки материалов опытных работ при выявленном сложном режиме формирования динамического уровня в безнапорном водоносном горизонте Болтоном предложен метод эталонной кривой. Использование этого метода на практике часто встречает трудности из-за несоответствия опытных и эталонных графиков. На основании опыта обработки большого объема опытно-фильтрационных работ, проведенных в условиях безнапорных водоносных горизонтов сделаны следующие выводы [5]: а) во многих случаях при опробовании безнапорных водоносных горизонтов сложный характер режима динамического уровня практически не проявляется; б) при наличии сложного режима формирования уровня представительные участки графика $S - lgt$ (третий участок квазистационарного режима), приемлемые для определения параметров, формируются в пределах времени, достижимого при проведении кустовых откачек — до 15 сут (как показывает опыт, величина запаздывания этого отрезка графика, будучи непредсказуемой, находится обычно в пределах от 1 до 8 сут); в) при обработке опытных данных в условиях сложного изменения уровня для определения гидрогеологических параметров пласта целесообразно пользоваться графиками комбинированного прослеживания (условием достаточной длительности откачки является выход графиков для разноудаленных скважин на общую асимптоту).

Режим уровня подземных вод в процессе опытных откачек в трещиноватых и закарстованных породах формируется под влиянием существенной неоднородности и анизотропии фильтрационных и емкостных свойств, а также двойной природной пустотности, когда крупные редкие трещины и карстовые по-

лости (макротрещины) образуют в породах трещиноватость первого порядка, а густая сеть мелкой трещиноватости и кавернозности (микротрещины) — трещиноватость второго порядка.

При таких структурных особенностях пород механизм фильтрации подземных вод представляется в следующем виде. При откачке в системах макропор в пласте происходит быстрое перераспределение напоров или уровней подземных вод. В отдельных прилегающих блоках (с микроструктурой) в силу малой проницаемости понижение уровня отстает, в результате чего возникает разница в напорах внутри блоков в микро- и макротрещинах. Эта разница со временем сглаживается. Процесс ведет к деформации графиков временного прослеживания уровня, т. е. на графиках появляется участок выполаживания уровня, или ложной стабилизации.

Исследованиями было установлено, что определение гидрогеологических параметров пласта в условиях «двойной пористости» по данным опытно-фильтрационных работ можно производить графо-аналитическим методом так же, как и для зернистых пород, если время, соответствующее анализируемому участку графиков, превышает характерное время запаздывания. При этом целесообразно использовать асимптотические участки опытных графиков изменения уровня (преимущественно графики комбинированного прослеживания). Контролем достаточной продолжительности откачки является выход графиков комбинированного прослеживания на общую асимптоту или, особенно для трещинно-карстовых вод, их параллельность. Графики площадного прослеживания использовать не рекомендуется. Опыт проведения откачек в трещиноватых и трещинно-карстовых породах показывает, что представительные для обработки участки графиков могут быть достигнуты при длительности откачек 11—15 сут.

ОЦЕНКА ВОДОПРОВОДИМОСТИ ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК ИЗ ОДИНОЧНЫХ СКВАЖИН

Как отмечалось выше, на поисковой стадии изучения месторождений подземных вод обычно проводятся пробные, реже опытные откачки из одиночных скважин без наблюдательных выработок.

Определение гидрогеологических параметров пласта по данным откачки из одиночной выработки связано с необходимостью учета влияния ряда специфических факторов: а) несовершенства скважин по степени вскрытия водоносного горизонта; б) нарушения фильтрационных свойств водовмещающих пород в прискважинной зоне при бурении (технические факторы); в) потерь напора при входе подземных вод в ствол скважины; г) изменения дебита опытной скважины во время откачки (технический фактор), а также таких явлений, как неоднородность

или анизотропия фильтрационных свойств водоносного горизонта, перетекание из смежных водоносных горизонтов и задержка реакции уровня в безнапорных зернистых или безнапорных и напорных трещиноватых породах. Влияние первых двух факторов ведет к тому, что понижение внутри скважины в подавляющем большинстве случаев существенно превышает понижение на ее внешней стенке. Поскольку для определения водопроводимости по формуле Дюпюи используется абсолютная величина понижения уровня и фактический диаметр бурения, которые не соответствуют действительным значениям, величина водопроводимости часто бывает занижена. Сопоставление результатов обработки одиночных и кустовых откачек показывает, что величина водопроводимости, найденная по одиночным откачкам, в среднем в три раза ниже, чем определенная по данным кустовых откачек.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ

Опытно-фильтрационные работы в процессе разведки месторождения подземных вод рекомендуется проводить по следующей технологической схеме: проектирование опытно-фильтрационных исследований, проведение работ на участке, выбранном под разведку, первичная документация опытно-фильтрационных работ, интерпретация результатов.

1. Проектирование видов, объемов и методики проведения опытно-фильтрационных работ должно быть частью общего проекта по разведке месторождения. Оно включает рассмотрение следующих основных вопросов: а) выбор и обоснование положения опытных кустов на площади разведочного участка; б) составление расчетной схемы опытного куста (условия размещения опытных и наблюдательных скважин в плане и в разрезе); в) определение продолжительности откачек, обеспечивающей возможность достоверной интерпретации результатов: г) выбор конструкции опытных и наблюдательных скважин и технических средств для проведения опытных откачек.

Кусты для определения гидрогеологических параметров водоносного горизонта целесообразно разместить относительно равномерно по площади разведочного участка, причем по возможности следует исключить при опытах влияние границ. Принимается в основном лучевая система расположения наблюдательных скважин. При обработке данных кустовых откачек по графикам площадного прослеживания для представительных моментов времени влиянием границ пласта в плане можно пренебречь, если расстояние от центральной до дальней наблюдательной скважины не превышает половины расстояния от центральной скважины до границы.

Число наблюдательных скважин и система их размещения, а также дебит опытной скважины выбираются таким образом,

чтобы наблюдательные скважины находились в зоне квазистационарного режима фильтрационного потока, а разность понижения уровня подземных вод в соседних скважинах и величина понижения уровня на конце откачки в дальней наблюдательной скважине значительно превышали точность замеров уровня и составляли не менее 20 см. В зависимости от сложности гидрогеологических условий, целей опыта и глубины залегания водоносного горизонта число наблюдательных скважин на опытном кусте может колебаться от двух до восьми. В простых условиях можно рекомендовать использование двух-трех наблюдательных скважин, расположенных на одном луче, что обеспечивает возможность контроля получаемых результатов по способам обработки и усреднения получаемых значений параметров. К простым условиям можно отнести относительно однородные напорные водоносные горизонты в зернистых или равномерно трещиноватых породах, а также слоистые толщи при совершенном вскрытии их всеми скважинами. В сложных условиях требуется большее число скважин — от трех до десяти с расположением их по двум лучам. К сложным условиям можно отнести неоднородные безнапорные водоносные горизонты в зернистых породах, напорные и безнапорные горизонты в трещиноватых и закарстованных толщах, слоистые разрезы при отсутствии четко выраженных непроницаемых прослоев между отдельными водоносными горизонтами при несовершенном вскрытии их опытными скважинами. Сложность этих условий в отношении интерпретации результатов откачек вызвана наличием эффектов запаздывания реакции в безнапорных горизонтах и двойной пористости в трещиноватых породах, а также невозможностью построения графиков площадного прослеживания для неравномерно трещиноватых и закарстованных водоносных горизонтов. В каждом случае число наблюдательных скважин выбирается индивидуально в зависимости от предполагаемой (или известной) сложности условий с точки зрения интерпретации данных откачек.

При откачках, проводимых для изучения и оценки граничных условий потока, обычно задается два луча — один параллельно границе, а другой перпендикулярно к ней; число наблюдательных скважин может колебаться от четырех до шести (две параллельно границе, две-три в сторону границы и одна-две по другую сторону границы (или одна скважина за рекой)). В речных долинах с анизотропией фильтрационных свойств водовмещающих пород число наблюдательных скважин на опытном участке может быть увеличено вследствие необходимости сооружения этажных пьезометров на луче, перпендикулярном к реке. В этом случае общее число наблюдательных скважин может возрасти до 10. При исследовании глубоко залегающих водоносных горизонтов (свыше 200 м) следует ограничиваться минимальным необходимым числом наблюдательных скважин, учитывая стоимость работ. Следует, однако,

иметь в виду, что неудовлетворительные результаты обработки такой откачки могут сделать неоправданными затраты на проведение опыта. В то же время при относительно небольшой глубине залегания опробуемого водоносного горизонта число наблюдательных скважин может быть увеличено по сравнению с минимальным необходимым. В каждом случае при проведении кустовых откачек следует использовать скважины различного назначения (поисковые, картировочные, разведочные) в качестве наблюдательных и при возможности учитывать существующие скважины при планировании размещения кустов. При проведении кустовых откачек с целью изучения условий взаимосвязи водоносных горизонтов наблюдательные скважины необходимо предусматривать в одних и тех же точках опробуемого горизонта и тех горизонтов, из которых может проявляться перетекание подземных вод; в разделяющих слабопроницаемых слоях целесообразно устанавливать датчики пластового давления (см. гл. 19). Расстояние от опытной скважины до ближайшей наблюдательной необходимо выбирать таким образом, чтобы исключить влияние прискважинных помех (деформация потока вследствие несовершенства опытной скважины или деформации безнапорного потока при осушении пласта). Исследованиями установлено, что эти помехи пренебрежимо малы на расстоянии, примерно равном мощности продуктивного водоносного пласта. При большой мощности водоносного горизонта (свыше 100 м) расстояние до ближайшей скважины может быть принято равным 0,7 m.

Остальные наблюдательные скважины должны быть размещены так, чтобы на полулогарифмическом графике площадного прослеживания точки замеров уровня располагались равномерно. Этому условию отвечает зависимость

$$r_{n+1} = \alpha r_n, \qquad (12.31)$$

где r_{n+1} и r_n — расстояния до наблюдательной скважины; α — коэффициент, принимаемый равным 1,5 для безнапорных вод и 2,5 для напорных.

Коэффициент α подобран таким образом, чтобы при понижении в центральной скважине на 3—4 м разность понижений по соседним наблюдательным скважинам была не менее 20 см. Контрольные расчеты показывают, что в большинстве случаев расстояние самых удаленных скважин от опытной не должно превышать 150 м для безнапорных водоносных горизонтов и 1500 м для напорных.

Степень возмущения определяет абсолютные величины понижения уровня подземных вод и темпы его последующего снижения в наблюдательных скважинах и поэтому влияет на достоверность получаемых результатов. Степень возмущения (или дебит опытной скважины) должна обеспечить при понижении уровня в центральной скважине на 3—4 м понижение на конец

опытной откачки (длительностью 10—15 суток) в самой удаленной наблюдательной скважине не менее 20 см и такую же разницу понижений между соседними наблюдательными скважинами. Тогда при точности замера уровня 1—2 см погрешностью измерений уровня можно будет пренебречь.

Выбор дебита опытной скважины прямо зависит от предполагаемой водопроводимости водоносного горизонта. Практика и расчеты показывают, что при соблюдении указанных выше условий необходимая степень возмущения может быть принята следующим образом: при водопроводимости продуктивного горизонта 50—500 м²/сут дебит опытной скважины должен быть 5—25 л/с; при водопроводимости 500—1000 м²/сут — 25—50 л/с; при водопроводимости 1000—3000 м²/сут — 50—150 л/с.

Продолжительность откачки должна обеспечивать стабилизацию уровней во всех наблюдательных скважинах для условий стационарного режима фильтрационного потока или получение представительных для интерпретации участков графиков прослеживания уровня при неустановившемся режиме фильтрации. Такие участки графиков, как отмечалось выше, получаются при наступлении на опытном участке квазистационарного режима фильтрации, т. е. по достижении контрольного времени. При соблюдении этого условия могут быть построены достаточно достоверные графики площадного прослеживания, по которым и определяются гидрогеологические параметры пласта. Для получения представительных графиков временного прослеживания требуется откачка большей продолжительности. Для напорных песчано-гравийно-галечных водоносных горизонтов длительность откачки, исходя из опыта интерпретации, рекомендуется принимать равной пятикратному контрольному времени, что позволяет также построить графики комбинированного и площадного прослеживания на несколько моментов времени, т. е. получить возможность контроля результатов по способам обработки. Для указанных водоносных горизонтов можно рекомендовать длительность откачки от 5 до 10 сут, в отдельных случаях — до 15 сут.

В безнапорных зернистых и трещиноватых водоносных горизонтах может проявляться запаздывание реакции уровня, связанное с эффектом Болтона или влиянием двойной пористости (в трещиноватых коллекторах). Опыт показывает, что величина запаздывания непредсказуема, однако в подавляющем большинстве случаев она не превышает нескольких суток, поэтому продолжительность кустовой откачки может быть принята равной 10—15 сут. Признаком необходимой и достаточной длительности откачек является выход графиков комбинированного прослеживания в разноудаленных скважинах на общую асимптоту или параллельность этих графиков (для водоносных горизонтов в трещиноватых породах).

Длительность откачек для определения взаимосвязи подземных и поверхностных вод определяется временем наступления

стабилизации уровня, которое, как правило, не превышает 15 сут.

В двух- и многослойной толщах длительность опробования зависит от мощности и фильтрационных свойств разделяющих или перекрывающих прослоев. При этом должна быть достигнута заметная реакция в смежном водоносном горизонте или в перекрывающей толще. При коэффициенте фильтрации разделяющего слоя порядка 10^{-3} м/сут и мощности 10—20 м для установления факта перетекания и определения необходимых параметров может потребоваться откачка длительностью до 40 сут. При коэффициенте фильтрации разделяющих слоев менее 10^{-3} м/сут и их мощности более 20 м факт перетока и его характеристики обычно не удается определить практикуемой длительностью откачек.

В последние годы ведется разработка натурных методов, позволяющих количественно охарактеризовать фильтрационные и емкостные свойства слабопроницаемых разделяющих слоев. К ним относятся гидродинамический и гидрогеохимический методы, позволяющие оценить фильтрационные свойства пород в интервалах скоростей, соответственно, 10^{-3}—10^{-5} м/сут и 10^{-4} — 10^{-7} м/сут.

Из гидродинамических методов перспективен метод с использованием датчиков пластового давления, позволяющий наблюдать за изменением давления в слабопроницаемых отложениях в процессе откачек или эксплуатации водозаборов.

Приведенные выше соображения по проведению кустовых откачек следует рассматривать как общие рекомендации, поэтому при проектировании опытных кустов в каждом конкретном случае необходимо производить предварительные расчеты по приближенным значениям гидрогеологических параметров с целью определения расстояний до наблюдательных скважин, выбора дебита опытных скважин, продолжительности опытных работ и др.

2. Натурное исполнение проекта опытно-фильтрационных работ включает: а) перенесение на натуру всех запроектированных скважин; б) бурение опытной и наблюдательной скважин в соответствии с выбранными конструкциями и технологией их проводки; в) планово-высотная инструментальная привязка; г) оборудование устья скважин для наблюдения за уровнем и дебитом опытной скважины (для регистрации расхода откачиваемой воды); д) строительство водовода для сброса откачиваемых вод и др.

3. В состав первичной документации опытно-фильтрационных работ входит: а) разработка расписания для регистрации уровней и определения дебита опытной скважины (схема постоянного и последовательного маршрутного обхода всех наблюдательных скважин, частота замеров уровня и расхода воды); б) первичная регистрация уровней и дебита в полевом журнале; в) построение индикаторных графиков в координатах S—$f(t)$,

Q—$f(t)$ для опытной скважины, а также S—lg, t, S—lg r и S—lg t/r^2 для опытной и наблюдательных скважин.

Построение таких графиков непосредственно на участке опытных работ может позволить корректировать ход откачки в зависимости от выявленных закономерностей изменения уровня подземных вод во времени и по площади.

4. Интерпретация результатов опытных работ и определение гидрогеологических параметров является завершающим этапом полевых опытных исследований. На этом этапе необходимо осуществить диагностику результатов выполненных опытно-фильтрационных исследований и определение гидрогеологических параметров пласта. Главная цель диагностики результатов опытных исследований состоит в выборе методики обработки, отвечающей реальным гидрогеологическим условиям опытного участка, а также установлении возможности использования полученной информации для дальнейших расчетов. При диагностике результатов выполненных откачек целесообразно: а) выполнить анализ полученных данных о геологическом строении и гидрогеологических условиях участка (по данным бурения скважин и их гидрогеологической документации) с целью уточнения литолого-гидрогеологических разрезов; б) уточнить ранее составленную (в стадию проектирования опытных работ) расчетную схему, отражающую природные условия опытного участка; в) проанализировать характер полученных графиков временно́го, площадного или комбинированного прослеживания и оценить их соответствие выбранной расчетной схеме, выбрать представительные участки этих графиков.

Завершающим этапом интерпретации результатов опытных работ является определение расчетных гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта по выделенным представительным участкам на индикаторных графиках.

Относительная стабильность расчетных величин, полученных по графикам для различных наблюдательных скважин, является признаком правильной интерпретации этих графиков.

В заключение необходимо подчеркнуть, что такие трудоемкие откачки следует проводить только на стадии детальной разведки месторождений, находящихся в сложных гидрогеологических условиях. Опытно-эксплуатационные откачки рекомендуется проводить из группы скважин, составляющих некоторую часть будущего водозабора и взаимодействующих друг с другом. Производительность такой откачки должна быть соизмеримой с проектной производительностью водозабора. При планировании откачки должно быть обеспечено сооружение или использование соответствующей наблюдательной сети, допускающей надежную интерпретацию результатов опыта. При установлении продолжительности следует учитывать необходимость оценки влияния известных границ продуктивного водоносного горизонта в плане и разрезе. Продолжительность опытно-эксплуатационной откачки принимается до двух месяцев и более.

Глава 13

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА И КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Важное место по своему значению при разведке и эксплуатации месторождений подземных вод занимают гидрологические исследования, изучение режима и качества подземных вод.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрологические исследования, изучающие естественный режим поверхностного стока, обычно проводятся при поисках и разведке тех месторождений, на площади которых подземные воды имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водами, когда последние являются основным источником формирования эксплуатационных запасов на выбранном под разведку участке. В таких природных условиях гидрологические работы приобретают важное значение. При изучении конкретных месторождений в состав гидрологических исследований должны входить:

а) сбор, обобщение и анализ материалов, характеризующих режим поверхностного стока, в том числе обобщение данных наблюдений, которые проводятся организациями специализированной Государственной гидрометеорологической службы СССР;

б) полевые (дополнительные) гидрологические исследования непосредственно по площади месторождения в период его разведки.

В процессе исследований по первому направлению необходимо представить характеристику режима поверхностного стока реки в многолетнем разрезе — расход и его изменения во внутригодовом и многолетнем циклах, температурный режим, режим паводковых и минимальных расходов реки, качество и санитарно-бактериологическое состояние поверхностных вод. При разведке участков под водозаборные сооружения инфильтрационного типа, как следует из требований Инструкции ГКЗ СССР [15], очень важно установить по результатам многолетних исследований внутригодовое распределение стока, в том числе минимальный средний за 30-ти суточный период расход для года 85, 90 или 95 %-ной обеспеченности. При этих расчетах необходимо сохранить в долине реки минимальный санитарный расход, значение которого должно быть согласовано с местными санитарно-эпидемиологическими станциями и органами по регулированию использования и охраны водных ресурсов.

На некоторых месторождениях подземных вод, приуроченных к речным долинам, могут быть созданы водозаборные участки, режим которых рассчитан на периодическую сработку естественных запасов в водоносных аллювиальных образованиях или в коренных породах с последующим их восполнением в

период прохождения в реке паводка. При разведке таких водозаборных участков в процессе гидрологических исследований необходимо установить продолжительность маловодного периода реки, в течение которого суммарный (проектный) дебит будущего водозабора будет превышать расход поверхностных вод, поступающих на питание подземных вод. При таких и других гидрологических условиях по результатам обобщения материалов требуется определить внутригодовое распределение поверхностного стока для лет 95 %-ной обеспеченности, 50 %-ной обеспеченности и того периода, в течение которого на месторождении были проведены гидрологические исследования.

В тех случаях, когда непосредственно по площади месторождения отсутствуют многолетние гидрологические наблюдения или недостаточно материалов для общей характеристики стока в многолетнем разрезе, целесообразно провести сбор и обобщение материалов по близко расположенным к месторождению рекам-аналогам.

В этом случае необходимо произвести пересчеты полученных результатов применительно к изучаемому объекту по разработанной в гидрологии методике. На месторождениях подземных вод, приуроченных к крупным речным долинам, минимальные расходы рек которых во много раз превышают суммарный дебит будущего водозаборного сооружения, обобщение и анализ гидрологических материалов несколько упрощается. При разведке таких месторождений должна быть представлена характеристика внутригодового стока, режим уровня и качество поверхностных вод.

Как отмечалось выше, кроме сбора и обобщения материалов ранее проведенных работ, на месторождениях проводятся дополнительные специальные полевые исследования. В комплекс дополнительных полевых гидрологических работ должно входить: проведение наблюдений за режимом уровня поверхностных вод непосредственно на площади разведочного участка; наблюдения за температурой воды; определение расходов реки (на небольших реках), когда минимальный ее расход соизмерим с производительностью будущего водозабора; изучение химического состава поверхностных вод и их мутности; изучение проявления русловых процессов (интенсивность переработки берегов во время прохождения паводков), площади затопления паводковыми водами, ледовых явлений и т. п. Для выполнения перечисленных выше работ на площади месторождения должна быть оборудована специальная сеть (гидрометрические посты, рейки и т. д.) для режимных наблюдений. Так как гидрологические данные являются очень важной информацией для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на участках, где проектируются инфильтрационные водозаборные сооружения, гидрологические исследования необходимо начинать в стадию поисковых работ и продолжать их до завершения полного цикла разведочных работ (более 3—5-ти лет). Это позволит предста-

вить более достоверную характеристику режима поверхностного стока.

При разведке некоторых месторождений подземных вод в состав полевых гидрологических методов исследований могут быть включены балансово-гидрометрические работы для оценки естественных ресурсов подземных вод.

Балансово-гидрометрические исследования, например, очень важно проводить при изучении месторождений подземных вод на площади конусов выноса, где четко проявляются процессы питания подземных вод (в вершинах конуса выносов) и их естественной разгрузки в виде большой группы родников. Эти процессы четко фиксируются в виде горизонтальной гидрогеологической зональности (см. рис. 20). Балансово-гидрометрические исследования на разведочном участке обычно проводятся с целью оценки естественных ресурсов подземных вод, изучения взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также выяснения общих условий формирования подземного потока. С целью решения перечисленных задач на площади месторождения конусов выноса должна быть организована специальная сеть гидрометрических постов. Наблюдательные посты в этом случае необходимо оборудовать таким образом, чтобы учесть все основные приходные и расходные статьи водного баланса (поверхностных и подземных вод). Результаты балансово-гидрометрических исследований могут позволить выявить условия и оценить объемы ежегодного пополнения естественных ресурсов подземных вод. Величину суммарного родникового стока и испарения в многолетнем разрезе можно в данном случае принять как нижний предел естественных ресурсов.

При поисках и разведке месторождений подземных вод, приуроченных к замкнутым или ограниченным по площади водовмещающим структурам (например, к замкнутым бассейнам трещинно-карстовых вод) или к линзам пресных вод, балансово-гидрометрические исследования должны быть направлены на изучение величины питания подземных вод (за счет инфильтрации атмосферных осадков или поверхностных вод). Эту величину можно рассматривать как нижний предел обеспеченности эксплуатационных запасов. В состав гидрологических работ должны входить: снегомерная съемка на выбранном опытном участке, гидрометрические исследования по наблюдательным постам, наблюдения за величиной инфильтрации атмосферной влаги и др. Более подробно эта методика описана С. К. Калугиным. Продолжительность цикла комплексных исследований должна составлять не менее трех лет. Поэтому исследования в указанном направлении необходимо начинать в стадию предварительной разведки месторождений.

Как видно из изложенного, при разведке месторождений подземных вод гидрологические исследования по своему содержанию и значению являются весьма важными. Результаты таких исследований являются одной из основных информаций, кото-

рая по существу предопределяет количественную и качественную оценку собственно эксплуатационных запасов подземных вод разведочного участка.

СТАЦИОНАРНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Стационарное изучение режима подземных вод является одной из важных частей общего комплекса поисково-разведочных гидрогеологических работ. Наиболее важное значение это направление работ имеет при поисках и разведке промышленных месторождений подземных вод речных долин, трещинно-карстовых вод и т. д. (см. табл. 1) (именно на месторождениях этой группы подземные воды имеют небольшую глубину залегания и их режим, как правило, тесным образом связан с режимом метеорологических и гидрологических факторов). В комплекс работ при этом должны входить: изучение режима уровня, дебита, химического и санитарно-бактериологического состава, а также температуры подземных и поверхностных вод.

Стационарное изучение режима подземных вод необходимо проводить по специально оборудованной наблюдательной сети в комплексе с изучением режима поверхностных вод. В эту сеть должны входить наблюдательные буровые скважины и гидрометрические посты на родниках и реках.

При размещении стационарной наблюдательной сети по площади разведочного участка необходимо в каждом конкретном случае учитывать гидрогеологические особенности изучаемого месторождения (граничные условия фильтрационного потока в плане и разрезе), а также необходимость решения следующих основных задач:

а) определение по наблюдательным скважинам годовой амплитуды колебания уровня подземных вод продуктивного горизонта, минимальные и максимальные глубины их залегания и использование этих данных при опытно-фильтрационных работах;

б) изучение режима уровня поверхностных вод в реке по наблюдательным рейкам;

в) изучение с помощью специально оборудованных наблюдательных пьезометров условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также возможной связи подземных вод продуктивного горизонта со смежными водоносными горизонтами, распространенными на разведочном участке;

г) оценка величины естественного питания подземных вод продуктивного водоносного горизонта в различные сезоны года (по данным амплитуды колебания уровня подземных вод и величине недостатка насыщения пласта);

д) определение по данным режимных наблюдений расчетных гидрогеологических параметров продуктивного горизонта и русловых отложений реки, а также параметров взаимосвязи под-

земных вод различных водоносных горизонтов (коэффициентов пьезопроводности и уровнепроводности, фильтрации, значения сопротивления русловых отложений реки и т. д.);

е) изучение режима родникового стока путем определения сезонных и многолетних изменений дебита родников;

ж) изучение характера и степени изменения качества подземных и поверхностных вод в годовом и многолетнем разрезе (оценка режима качества подземных и поверхиостных вод должна производиться по результатам изучения химического и санитарно-бактериологического их состава).

Как видно из приведенного перечня задач, режимные наблюдения требуют применения творческого подхода, поэтому нецелесообразно приводить какие-либо рекомендации по стандартным схемам размещения наблюдательной сети на разведочных участках при изучении различных типов месторождений подземных вод. В этом отношении можно только перечислить основные принципиальные методические приемы проектирования опорной наблюдательной сети для стационарного изучения режима подземных и поверхностных вод.

Первым методическим приемом является строгий учет граничных условий фильтрационного потока в плане и разрезе, которые по существу и определяют формирование режима в естественной обстановке. Граничные условия — это комплекс природных факторов, характеризующих связь продуктивного водоносного горизонта с окружающей геологической средой. К геологическим факторам следует отнести геолого-структурные условия залегания и литологический состав водовмещающих и разделяющих их водонепроницаемых пород. К гидрогеологическим факторам относятся: взаимоотношение продуктивного горизонта с перекрывающими и подстилающими слоями, связь с другими водоносными горизонтами, а также с поверхностными водами; условия питания подземных вод и восполнение их ресурсов и запасов.

Вторым методическим приемом в размещении наблюдательной сети является метод аналогии, учитывающий опыт эксплуатации действующего вблизи разведочного участка водозаборного сооружения.

Во всем комплексе исследований режима подземных и поверхностных вод очень важным элементом является частота замеров в опорных пунктах. В каждом конкретном случае выбор частоты таких замеров определяется характером решения перечисленных выше задач и их значением для оценки эксплуатационных запасов подземных вод, т. е. предусматривается непосредственно проектом поисково-разведочных гидрогеологических работ.

В соответствии с требованием действующей Инструкции ГКЗ СССР [14], продолжительность непрерывных комплексных наблюдений за естественным режимом грунтовых вод и неглубоко залегающих артезианских вод должна составлять не менее

одного года. В связи с этим исследования по изучению режима подземных и поверхностных вод следует проводить, начиная со стадии детальных поисков и продолжать в полном объеме до завершения общей разведки месторождения. На месторождениях подземных вод, оценка эксплуатационных запасов которых производилась по значению родникового стока, наблюдения за режимом (расходом, химическим и бактериологическим составами и температурой) должны иметь продолжительность не менее двух лет.

Большое значение комплексные исследования режима подземных вод приобретают в стадию эксплуатационной разведки на участках действующих водозаборов. По своему содержанию этот вид гидрогеологических работ, изучающий опыт эксплуатации, является основой для переоценки запасов подземных вод и выбора наиболее рациональных условий их длительного отбора на каптажном сооружении. Стационарные наблюдения в эту стадию разведки по существу направлены на изучение уже нарушенного режима подземных вод.

Для решения задач, возникающих в стадию эксплуатации объекта, и для дальнейшего совершенствования собственно методики разведки месторождений подземных вод очень важна сравнительная оценка результатов разведки и опыта эксплуатации. В процессе эксплуатации водозаборного сооружения необходимо также определить степень влияния отбора подземных вод на изменение геологической, а в некоторых случаях окружающей среды в целом.

Учитывая перечисленные выше задачи, в состав стационарных наблюдений за нарушенным режимом подземных вод должны входить: а) наблюдение за дебитом эксплуатационных скважин, уровнем подземных вод и их температурой; б) наблюдения за изменением качества подземных и поверхностных вод (химическим составом, содержанием в них вредных компонентов) и санитарно-бактериологическим состоянием; в) наблюдение за развитием подземных вод по площади депрессионной воронки; г) изучение техногенных процессов, формирующихся при длительной эксплуатации подземных вод и оказывающих свое негативное влияние на изменение окружающей среды; д) изучение режима взаимосвязи подземных вод и поверхностных вод (на объектах, где это необходимо); е) изучение гидрогеологических параметров пород продуктивного горизонта; ж) изучение технического состояния эксплуатационных скважин и работы в них фильтров.

Как видно из перечисленного выше состава работ, на участке действующего водозаборного сооружения должна быть организована специальная постоянно действующая опорная сеть наблюдательных пунктов. При этом прежде всего должна быть осуществлена преемственность опорной режимной сети, которая была ранее создана в стадию предварительной и детальной разведки месторождения.

При исследовании режима подземных вод на площади действующего инфильтрационного водозабора одной из главных задач стационарных наблюдений является изучение условий гидравлической связи подземных вод продуктивного горизонта с поверхностными водами. Как показывает опыт, при длительной эксплуатации инфильтрационных водозаборов нередко развиваются техногенные процессы кольматации русловых отложений реки. В связи с этим ухудшаются их фильтрационные свойства, и как следствие, происходит изменение общей производительности водозаборных скважин. Поэтому при изучении режима на участках инфильтрационных водозаборов очень важно оборудовать специальную наблюдательную сеть между эксплуатационными скважинами прибрежной части и руслом реки.

В соответствии с требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14] во всех случаях разведки месторождений подземных вод в районах, где имеются действующие водозаборные сооружения, гидрогеологические исследования должны начинаться с изучения опыта их эксплуатации, и прежде всего со сбора и обобщения гидрогеологических материалов по нарушенному режиму подземных вод. В тех случаях, когда на действующем водозаборном сооружении не проводятся стационарные наблюдения за нарушенным режимом подземных вод и отсутствует наблюдательная сеть, геолого-разведочная организация по согласованию с заинтересованными сторонами обязана организовать на эксплуатационном участке цикл режимных наблюдений. Для этой цели в проекте работ разведки должно быть предусмотрено бурение и оборудование специальных наблюдательных скважин на участке действующего водозабора. В комплекс режимных наблюдений в этом случае должны быть включены контрольные замеры дебитов эксплуатационных скважин и уровней воды в них. Количество наблюдательных скважин на таких водозаборах, схема их расположения и частота наблюдений за режимом определяются особенностями гидрогеологических условий эксплуатируемого месторождения, граничными условиями, системой расположения водозаборных скважин и поэтому в каждом конкретном случае с учетом этих основных факторов определяются проектом поисково-разведочных работ. Для выбора рациональной схемы наблюдательных пунктов можно применять способ предварительных аналитических расчетов. Однако, в принципе, во всех случаях наблюдательные скважины должны располагаться непосредственно в центре и на флангах водозаборного сооружения, а также в зоне его влияния по площади депрессионной воронки.

Если на действующем водозаборе в процессе эксплуатации выявлено изменение качества подземных вод продуктивного горизонта, в проекте работ целесообразно предусмотреть бурение специальных наблюдательных скважин для выяснения источников загрязнений подземных вод. При изучении опыта экс-

плуатации подземных вод на действующем водозаборном сооружении необходимо также собрать данные, характеризующие проявление техногенных процессов, негативное влияние которых приводит к изменению условий окружающей среды: усыханию болот, дренированию родников и поверхностного стока, явлению деформации поверхности, суффозионно-карстовым процессам и др. Данные эти должны быть использованы для прогнозной оценки (методом аналогии) возможного развития техногенных процессов на площади разведываемого участка (будущего водозаборного сооружения).

КАЧЕСТВЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Качественное опробование подземных и поверхностных вод (на объектах, где это необходимо) является очень важным видом гидрогеологических исследований. Результаты этих работ позволяют решать вопрос о возможности использования подземных вод разведываемого месторождения для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения. Основные требования к качеству хозяйственно-питьевых подземных вод, содержащиеся в ГОСТ 2874-82, приведены ниже:

Показатели	*Норма не более*
Сухой остаток	1000 мг/л
Сульфаты	500 мг/л
Хлориды	350 мг/л
Мутность по стандартной шкале	1,5 мг/л
Цветность по шкале	20°
Запах и привкус при температуре 20 °С	2 балла
Общая жесткость	7,0 ммоль/л
Железо	0,3 мг/л
Свинец	0,03 мг/л
Селен	0,01 мг/л
Мышьяк	0,05 мг/л
Фтор (для разных климатических районов)	0,7—1,5 мг/л
Цинк	5,0 мг/л
Бериллий	0,0002 мг/л
Нитраты (по NO_3)	10,0 мг/л
Общее количество бактерий в 1 мл неразбавленной воды	100
Количество бактерий группы кишечной палочки, определяемой на плотной, элективной среде с применением мембранных фильтров в 1 л воды (коли-индекс)	3
Активная реакция после осветления или умягчения воды	6,5—8,5

В исключительных случаях по согласованию с органами санитарного надзора допускается увеличение цветности воды до 35°, жесткости до 10 ммоль/л, содержание сухого остатка до 1500 мг/л.

В состав качественного опробования подземных вод входят: а) отбор проб воды из гидрогеологических скважин, родников и поверхностных водотоков для последующего производства ла-

бораторных исследований; б) лабораторные исследования с целью изучения вещественного состава подземных вод (в том числе санитарно-бактериологического состава) и физических свойств.

Качественное опробование подземных вод должно производиться, начиная со стадии детальных поисков, а затем во всех последующих стадиях разведки месторождений. Только в этом случае качество подземных вод может быть изучено с необходимой детальностью. Отбор проб воды для изучения химического и бактериологического состава и физических свойств необходимо выполнять как непосредственно при бурении гидрогеологических скважин, так и в процессе проведения различных опытно-фильтрационных работ, а также при наблюдениях за режимом подземных вод.

При этом должны быть опробованы подземные воды продуктивного горизонта, смежных с ним других водоносных горизонтов, а также поверхностных вод (на месторождениях, где поверхностные воды играют определенную роль в формировании эксплуатационных запасов подземных вод).

В стадию разведки конкретного водозаборного участка отбор проб воды должен производиться из всех разведочных скважин. Частоту отбора проб и их качество целесообразно определять при проектировании поисково-разведочных работ в каждом конкретном случае в зависимости от степени сложности гидрогеохимических условий изучаемого месторождения и санитарного состояния прилегающей территории.

Качество подземных вод оценивается по данным лабораторных исследований отобранных проб. В результате исследований в подземных водах должны быть определены: химический состав, органические, неорганические соединения, содержание вредных компонентов, радиоактивных веществ и т. д., как это следует из требований ГОСТ.

САНИТАРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ РАЙОНА МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Изучение санитарных условий района разведки необходимо произвести в стадиях предварительной и детальной разведки. В основные задачи этого изучения входят: а) оценка возможных очагов и источников загрязнения подземных вод продуктивного горизонта; б) обоснование зон санитарной охраны будущего водозаборного сооружения.

Для решения этих задач должно быть выполнено рекогносцировочное обследование территории, прилегающей к площади разведочного участка. Обследование целесообразно провести совместно с представителями местных органов санитарно-эпидемиологической службы.

С учетом общих закономерностей, отражающих условия формирования подземных вод продуктивного горизонта разведоч-

ного участка, и результатов целенаправленных рекогносцировочных исследований необходимо выяснить санитарное состояние района и установить наличие или отсутствие возможных источников загрязнения подземных вод (участков возможного скопления бытовых и промышленных сточных вод, твердых производственных отходов; участков складирования и хранения нефтепродуктов, химических препаратов и т. п.). В случае обнаружения очагов возможного загрязнения подземных вод, необходимо пробурить специальные скважины с целью оценки характера и степени загрязненности подземных вод и оконтуривания ореолов загрязнения. После проведения специальных исследований буровые скважины целесообразно оборудовать для последующего изучения режима подземных вод совместно с общей опорной стационарной сетью разведочного участка.

Вторая важная задача, как уже отмечалось, состоит в том, чтобы обосновать зоны санитарной охраны на будущем водозаборном сооружении. В соответствии с [25] на всех участках водозаборных сооружений должна быть установлена зона санитарной охраны, в состав которой входят три пояса: а) первый пояс — пояс строгого режима; б) второй и третий пояса — зоны ограниченного режима.

Первый пояс предназначен для охраны и защиты участка, примыкающего непосредственно к водозаборным сооружениям (участок расположения водозаборных скважин, насосной станции, резервуара и т. п.). При эксплуатации безнапорных подземных вод границы первого пояса зоны санитарной охраны должны находиться на расстоянии от водозаборных сооружений не менее 50 м, а при использовании напорных артезианских вод — не менее 30 м. Территория первого пояса всегда ограждается и на ее площади постоянно проводятся наблюдения за санитарным состоянием.

Второй пояс предназначен для защиты водоносного горизонта от микробных загрязнений. В пределах площади второго пояса не допускается распространение возможных источников загрязнения подземных вод (не допускается производство земляных и каких-либо строительных работ, сброс хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод). Учитывая эти требования, границы второго пояса должны находиться на таком расстоянии от участка водозаборного сооружения, чтобы полностью исключить миграцию тех или иных источников микробного загрязнения подземных вод.

Основным параметром, определяющим выбор расстояния от границы второго пояса зоны санитарной охраны, является расчетное время продвижения микробного загрязнения с потоком подземных вод к водозабору, которое должно быть достаточным для утраты жизнеспособности патогенных микроорганизмов, т. е. для эффективного самоочищения. Если очаг загрязнения расположен за пределами этой границы, микробное загрязнение не достигает водозабора. Граница второго пояса зоны санитар-

ной охраны в каждом конкретном случае определяется гидродинамическими расчетами.

Третий пояс предназначен для защиты подземных вод от химических загрязнений. Расположение границ третьего пояса зоны санитарной охраны также определяется гидродинамическими расчетами. Эти расчеты должны исходить из условий, если за пределами границ третьего пояса (вне области захвата водозабора) в продуктивный горизонт поступят химические загрязнения, то они не достигнут водозабора (см. гл. 18).

Время продвижения загрязненной воды от границы третьего пояса до водозабора должно быть больше проектного срока эксплуатации водозабора (25—50 лет). Если разведанные запасы подземных вод утверждены на неограниченный срок эксплуатации водозабора, границы третьего пояса должны обеспечить соответственно длительное сохранение качества подземных вод.

Раздел V.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Глава 14
ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ И ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПАСОВ

Как видно из приведенной в гл. 2 классификации количественных категорий пресных подземных вод, для решения прикладных задач в области разведочной гидрогеологии первостепенное значение имеет оценка их эксплуатационных запасов — величина, которая по существу характеризует эксплуатационные возможности того или иного месторождения. Наряду с этим для некоторых типов месторождений не менее важное значение имеет оценка естественных ресурсов и естественных запасов подземных вод, когда эти виды ресурсов и запасов являются основными источниками формирования эксплуатационных запасов на водозаборном участке.

Выше отмечалось, что естественные ресурсы подземных вод характеризуют величину их суммарного естественного питания. Во многих случаях естественные ресурсы могут представлять собой естественный расход фильтрационного потока в его поперечном сечении, если на площади его развития (в пределах месторождения) не будет происходить разгрузка подземных вод либо в виде родников, либо в форме скрытого дренирования.

Для месторождений подземных вод первой группы, приуроченных к безнапорным пластам (см. табл. 4), источниками формирования естественных ресурсов могут быть: инфильтрация атмосферных осадков, питание за счет конденсации влаги из воздуха в породах зоны аэрации, инфильтрация поверхностных вод, а также подземного бокового притока со стороны смежных водоносных структур. Расходными статьями баланса подземных вод являются различные виды естественной разгрузки: в поверхностные водотоки и водоемы, боковой отток в смежные структуры, а также испарение и транспирация грунтовых вод. Роль этих процессов в формировании естественных ресурсов неодинакова и зависит от природных условий конкретных месторождений. Так, например, для некоторых типов месторождений грунтовых вод основным источником формирования естественных ресурсов является инфильтрация атмосферных осадков (на месторождениях подземных вод древних речных долин Казахстанского типа и др.). Поэтому часто по величине ин-

фильтрации атмосферных осадков оценивается значение естественных ресурсов.

Для месторождений подземных вод второй группы с напорным режимом формирование естественных ресурсов может происходить за счет бокового притока (со стороны смежных областей) и за счет перетекания подземных вод через подошву и кровлю продуктивного напорного горизонта (из смежных водоносных горизонтов). Расходными статьями баланса напорных вод могут быть: боковой отток за пределы границ месторождения, перетекание в смежные водоносные горизонты (в тех случаях, когда напор продуктивного горизонта больше, чем в смежных пластах), разгрузка в виде родников и т. п. Как показала практика разведки и эксплуатации месторождений напорных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа, ведущую роль в формировании естественных ресурсов играют процессы перетекания через слабопроницаемые пласты, в том числе перетекания грунтовых вод речных долин, залегающих выше по разрезу. Это очень важное положение отражено в ряде опубликованных работ [5, 20, 29, 32].

Для всех типов месторождений подземных вод важными гидрогеологическими факторами, определяющими условия формирования естественных ресурсов подземных вод, являются: фильтрационные свойства водовмещающих пород, пород зоны аэрации и разделяющих слоев, мощность водоносного горизонта, глубины залегания уровня и др.

Некоторые специфические условия формирования естественных ресурсов подземных вод отмечаются на месторождениях, распространенных в области многолетнемерзлых пород. Формирование естественных ресурсов в этих областях зависит от глубины ежегодного промерзания и протаивания, условий распространения вечной мерзлоты и таликовых зон и др. На площадях, где мерзлота достигает большой мощности (более 100 м) и сплошного распространения, естественные ресурсы подземных вод могут формироваться в таликовых зонах, в том числе в сквозных таликах зон тектонических нарушений.

При изучении условий формирования естественных ресурсов подземных вод необходимо учитывать, что существенное влияние на них может оказать техногенная водохозяйственная деятельность человека в районах месторождений (строительство водохранилищ, эксплуатация ирригационных каналов, искусственное орошение земель и др.). Именно поэтому в каждом конкретном случае при изучении естественных ресурсов подземных вод необходимо строго учитывать природные (ненарушенные) и техногенные (нарушенные) условия их формирования на площади месторождений.

Естественные ресурсы подземных вод являются объективным показателем ежегодного их восполнения, отражая их основную особенность — постоянное возобновление. По мнению И. С. Зекцера и В. А. Всеволожского, среднемноголетнее значение ве-

личины питания подземных вод, за вычетом испарения, равно величине подземного стока. Учитывая это положение, в практике гидрогеологических исследований естественные ресурсы подземных вод обычно выражаются среднегодовыми и минимальными значениями модуля подземного стока (в л/с с 1 км^2), величинами слоя воды (в мм/год), общими величинами расхода потока (м^3/сут или л/с), когда испарение подземных вод невелико.

Одним из проявлений подземного стока является подземный приток в реки (подземное питание рек) из зоны водонасыщенных горных пород, находящихся в сфере дренирующего влияния речной сети. Для подземных вод этой зоны, питающихся главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков, важными воднобалансовыми характеристиками являются коэффициент подземного стока и коэффициент подземного питания рек. Коэффициент подземного стока (отношение величины подземного стока к мощности слоя атмосферных осадков, выпадающих за год) количественно характеризует долю осадков, которая идет на питание подземных вод. Коэффициент подземного питания рек (отношение дренируемого подземного стока к общему речному стоку) показывает, какая часть расхода реки обеспечена за счет естественной разгрузки подземных вод.

Таким образом, естественные ресурсы подземных вод для некоторых типов месторождений (например с ограниченными естественными запасами) представляют собой тот верхний предел, который определяет их эксплуатационные возможности, за исключением тех водозаборных участков, эксплуатационные запасы которых формируются преимущественно за счет дополнительно привлекаемых ресурсов. Поэтому роль естественных ресурсов подземных вод, как одного из генетических компонентов эксплуатационных запасов, может быть различной для различных типов месторождений.

Естественные запасы подземных вод имеют те же источники питания, что и естественные ресурсы, накапливаясь в природных емкостях водоносных пород (порах, трещинах, закарстованных пустотах). Именно поэтому естественные запасы подземных вод определяются емкостными свойствами водовмещающих пород и их параметрами — в безнапорных пластах преобладает гравитационная емкость, а в напорных пластах, наряду с гравитационной емкостью, упругая емкость водовмещающих пород. Естественные запасы принято выражать в объемах. Та часть массы подземных вод, которая может быть извлечена из напорного водоносного горизонта за счет изменения упругих свойств воды и водовмещающих горных пород без осушения пласта, может быть отнесена к упругим естественным запасам. Величина упругих естественных запасов по сравнению с гравитационными обычно составляет доли процента.

Параметры гравитационной емкости пласта отражают способность водонасыщенных горных пород отдавать часть воды

в условиях свободного стекания ее под действием силы тяжести. В этом случае гравитационная емкость пласта характеризуется гравитационной водоотдачей. Мерой гравитационной водоотдачи является коэффициент водоотдачи, выраженный в долях единицы (отношение объема гравитационной воды, способной свободно вытекать из насыщенных горных пород, к их осушенному объему).

Водоотдача насыщенных горных пород является довольно сложным гидрогеологическим процессом. Изучен этот процесс для различных литологических разностей водовмещающих пород очень слабо (относительно изучен процесс для песчаных пород). Исследованиями было установлено, что коэффициент водоотдачи для одной и той же водовмещающей породы может изменяться в зависимости от продолжительности времени проведения опытных работ; в некоторых случаях с увеличением времени величина водоотдачи возрастает. Это явление объясняется прежде всего длительностью стекания подземных вод из капиллярной зоны насыщенных пород.

Исследованиями было установлено [5, 24], что коэффициент водоотдачи горных пород существенно зависит от их литологического состава и физико-механических свойств. Ниже приведены значения коэффициентов водоотдачи различных горных пород, которые могут быть использованы для приближенной оценки естественных запасов подземных вод:

Песчаные породы	0,10—0,20
Пески пылеватые и глинистые	0,05—0,10
Супеси, суглинки	0,02—0,05
Закарстованные и трещиноватые известняки	0,005—0,10
Трещиноватые сланцы, песчаники и изверженные породы	0,001—0,03

Несмотря на то что величина коэффициента водоотдачи может изменяться во времени, его значение для решения прикладных задач в области разведки подземных вод, в том числе и для оценки естественных запасов, приближенно принимается постоянным.

Естественные запасы подземных вод, как видно из изложенного выше, характеризуют количество гравитационных вод, заполняющих природные емкости водовмещающих горных пород; размерность естественных гравитационных запасов принята в объемных единицах (в кубических метрах или километрах).

На некоторых месторождениях подземных вод, например, на месторождениях конусов выноса широких речных долин, где мощность водовмещающих пород очень значительна (до 400 м), формируются очень крупные по своему объему естественные запасы; для месторождений подземных вод древних речных долин Казахстанского типа (например, в долине р. Джон) естественные запасы подземных вод являются единственным источником формирования эксплуатационного дебита водозаборных сооружений.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В настоящее время в гидрогеологии разработано несколько методов оценки естественных ресурсов подземных вод, которые успешно используются как при их определении в региональном масштабе (для всей площади распространения водоносных горизонтов), так и при разведке отдельных водозаборных участков. Региональная оценка естественных ресурсов подземных вод обычно производится для значительных территорий с целью получения средней или суммарной характеристики общих ресурсов. Результаты региональных исследований применяют для составления схем комплексного использования водных ресурсов крупных территорий, оценки роли подземного стока в общем водном балансе, перспективного планирования их использования, а также региональной оценки различных геолого-геохимических процессов. В связи с этим методы региональной оценки естественных ресурсов в настоящей работе не рассматриваются.

Методика региональной оценки естественных ресурсов достаточно подробно изложена в работах Б. И. Куделина, И. С. Зекцера, В. А. Всеволожского, И. Ф. Фиделли и др.

В табл. 15 в качестве общего обзора приведены основные методы оценки естественных ресурсов подземных вод, заимствованные из работы [11].

Определение естественных ресурсов и естественных запасов подземных вод на площади некоторых месторождений (где отсутствуют условия привлечения ресурсов подземных вод за счет инфильтрации поверхностных вод) чаще всего производится с целью оценки степени обеспеченности собственно эксплуатационного отбора подземных вод на проектируемом водозаборном участке. В этом случае суммарное значение естественных ресурсов и запасов можно рассматривать как нижний предел эксплуатационных запасов разведочного участка.

Приведем краткое описание некоторых наиболее распространенных в практике поисково-разведочных гидрогеологических работ методов оценки естественных ресурсов подземных вод.

Расчет расхода потока в его поперечном сечении можно произвести по уравнению Дарси:

$$Q_p = \frac{k_1 F_1 + k_2 F_2}{2} I, \qquad (14.1)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации водоносного горизонта в его поперечных сечениях выше и ниже по потоку, расположенных перпендикулярно к направлению движения потока; F_1 и F_2 — соответствующие площади поперечных сечений потока; I — среднее значение напорного градиента между сечениями.

В практике разведочных работ чаще всего производится оценка расхода потока по одному, наиболее характерному, разведанному поперечнику; значение уклона потока при этом определяется по карте гидроизогипс.

Таблица 15. Основные методы оценки естественных ресурсов подземных вод

Группа методов	Основные разновидности методов	Рекомендуемая область применения
Гидродинамические (в том числе метод математического моделирования)	Методы изучения режима подземных вод (конечных разностей, расчета питания грунтовых вод по режиму уровня в одиночной скважине и др.)	Для оценки площадного питания, преимущественно для месторождений безнапорных подземных вод (питание за счет инфильтрации атмосферных осадков)
	Методы расчета расхода подземного потока в поперечном его сечении по формулам динамики подземных вод	Для оценки расхода потока, преимущественно для месторождений безнапорных подземных вод
	Метод расчета питания за счет перетекания подземных вод через слабопроницаемые пласты	Для месторождений напорных и безнапорных подземных вод
Балансово-гидрометрические	Собственно балансово-гидрометрический метод, основанный на решении уравнения водного баланса для локальных участков, по данным стационарного изучения режима поверхностных и подземных вод (родникового стока, испарения и др.)	Преимущественно для месторождений подземных вод конусов выноса, имеющих сложные условия формирования естественных запасов; для месторождений подземных вод широких речных долин
	Метод гидрометрический основан на определении разности расходов рек по двум гидрометрическим постам, расположенным выше и ниже разведочного участка	Преимущественно для месторождений подземных вод узких речных долин
	Метод, основанный на изучении родникового стока подземных вод по данным гидрометрических измерений	Для месторождений подземных вод с четко выраженной зоной естественной разгрузки подземных вод в форме родников
	Метод генетического расчленения гидрографов	Преимущественно при региональной оценке естественных ресурсов крупных территорий

Продолжение табл. 15

Группа методов	Основные разновидности методов	Рекомендуемая область применения
Гидрогеологической аналогии (основан на сравнении гидрогеологических данных поисковой площади с данными района-аналога, по которому ранее была произведена оценка естественных ресурсов подземных вод по аналогии граничных условий формирования естественных ресурсов)	—	Может быть применен для предварнтельной оценки нового района в стадию детальных поисков

При разведке месторождений грунтовых вод аллювиальных отложений широких речных долин, когда разбурен специальный поперечный профиль потока, целесообразно для повышения достоверности оценки расхода потока учитывать неоднородность фильтрационных свойств водовмещающих пород и различные значения уклона потока. С этой целью по данным буровых, геофизических и опытно-фильтрационных работ целесообразно вначале составить фильтрационный профиль речной долины, на котором следует выделить отдельные фильтрационные блоки с различными значениями коэффициента фильтрации водоносных пород (рис. 41). При таком приеме, как видно из схемы,

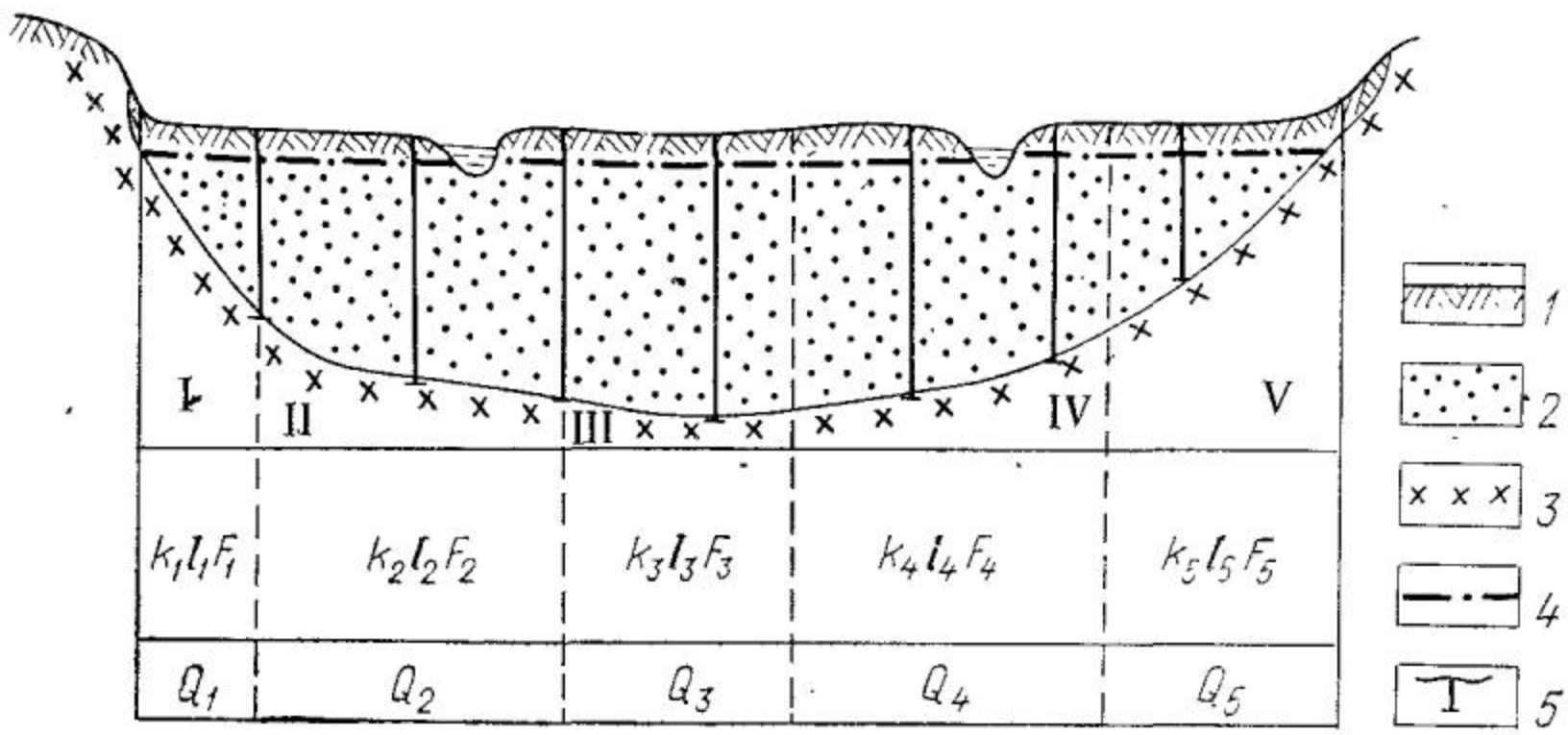


Рис. 41. Схема определения расхода естественного потока грунтовых вод в его поперечном сечении.

1 — почвенный слой; *2* — водоносные породы; *3* — водонепроницаемые породы; *4* — уровень грунтовых вод; *5* — разведочные скважины. Римскими цифрами даны номера фильтрационных блоков

естественный расход потока будет складываться из расходов потока по отдельным фильтрационным блокам:

$$Q_{\text{ест}} = k_1 F_1 I_1 + k_2 F_2 I_2 + \ldots + k_n F_n I_n, \qquad (14.2)$$

где $k_1, k_2, \ldots, k_n$ — коэффициенты фильтрации соответствующих фильтрационных блоков; F_1, F_2, ..., F_n — соответствующие им значения площади поперечного сечения; I_1, $I_2, \ldots, I_n$ — уклоны фильтрационного потока по блокам.

Значения уклона фильтрационного потока при этом необходимо принимать по гидроизогипсе, расположенной выше по потоку от разведанного поперечника между гидроизогипсами. На рис. 42 в качестве примера представлен поперечный фильтрационный профиль широкой долины р. Ангрен.

Как видно из приведенного описания, для оценки естественных ресурсов подземных вод по расходу фильтрационного потока, на разведочном участке необходимо провести бурение гидрогеологических скважин, а также опытно-фильтрационные исследования для определения фильтрационных свойств водовмещающих пород.

Основным недостатком гидродинамического метода оценки естественных ресурсов является невозможность определения многолетней изменчивости параметров подземного стока и расчетов среднемноголетних его значений. Многолетнюю изменчивость ресурсов можно приближенно оценить по данным режимных наблюдений.

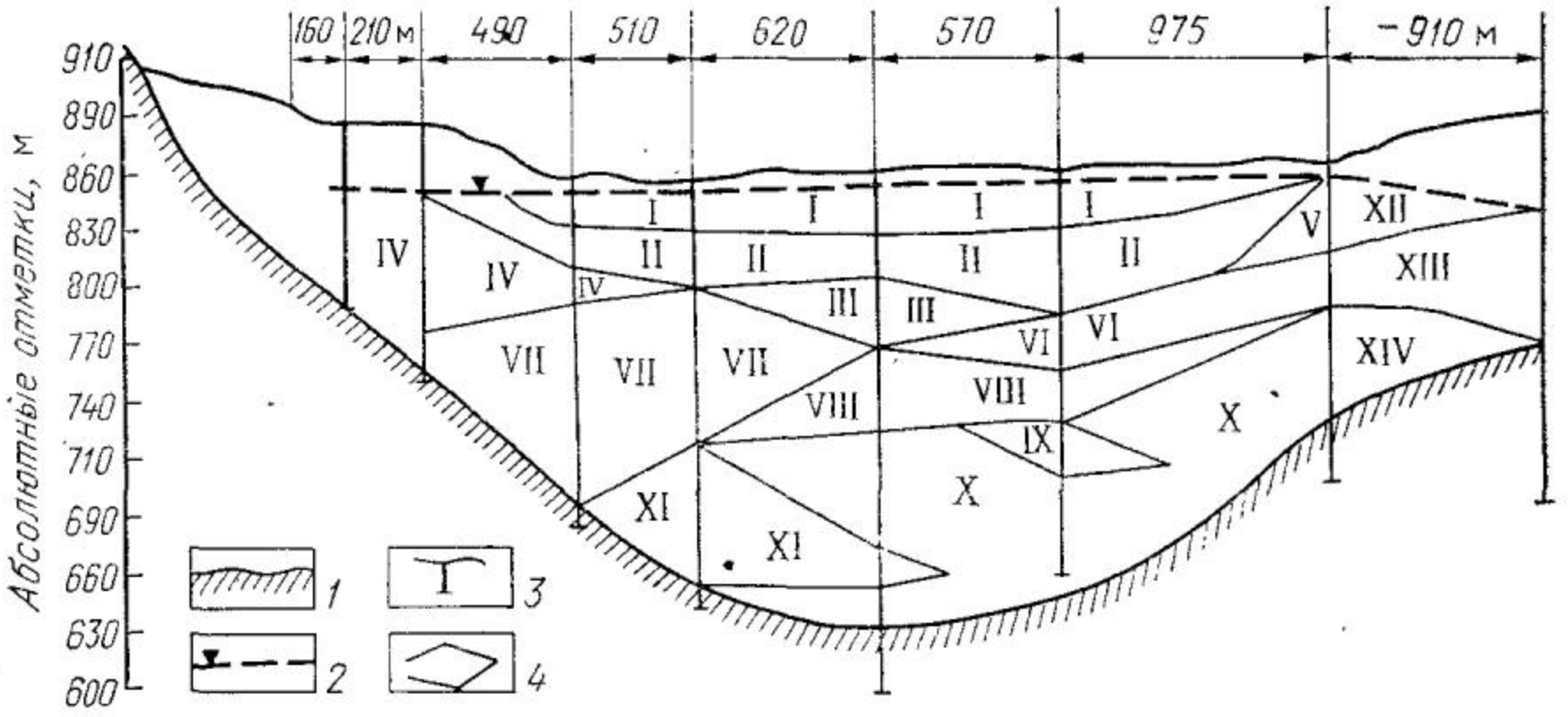


Рис. 42. Фильтрационный профиль и блокировка живого сечения реки Ангрен для подсчета естественных запасов грунтовых вод (по данным Р. В. Бородина и А. Ф. Кальницкого).

1 — коренные породы; *2* — уровень грунтовых вод; *3* — скважины; *4* — граннцы блоков. I — XIV блоки: I—F=22 424,85; k=7,98. *II* — F=45 318,2; k=0,889. *III* — F=9300; k=5,8. *IV*—F=27 612,4; k=5,116. V—F=4785,6; k=5,0. VI—F=19 472,8; k=2,387. VII—F=84 567,3; k=0,018. VIII—F=44 075,0; k=0,613. IX—F=4445,0; k=3,5. X—F=111 129,8; k=0,306. XI—F=24 886,8; k=1,231. XII — F=9450; k=3,5. XIII—F=35 555; k=29. XIV—F=6300; k=1,0.
F — площадь фильтрационного блока в квадратных методах. k — среднее значение коэффициента фильтрации по блоку

Метод оценки естественных ресурсов подземных вод по величине их ежегодного питания за счет инфильтрации атмосферных осадков для месторождений трещинно-карстовых вод замкнутых бассейнов (ограниченных по площади структур) был разработан С. К. Калугиным для условий аридного климата. Особенности гидрогеологических условий аридной зоны состоят в том, что питание подземных вод происходит главным образом в период весеннего снеготаяния. Сущность метода состоит в экспериментальном определении элементов баланса влаги на опытном участке. С этой целью на площади разведываемого месторождения необходимо выбрать опорный микробассейн (стоковая площадка) для стационарных наблюдений. В пределах опытного бассейна в предвесенний период с частотой 1—2 раза проводится снегомерная съемка для определения запасов влаги в снеге. Количество влаги в снежном покрове затем суммируется с атмосферными осадками, выпавшими в период снеготаяния на площади опытного микробассейна. Это суммарное количество влаги С. К. Калугин назвал «эффективными осадками». В этом случае инфильтрационное питание трещинно-карстовых вод можно определить по следующему уравнению баланса влаги в замкнутом бассейне:

$$Q_{\text{ннф}} = x_{\text{эф}} - (y_{\text{в}} + z_{\text{в}}), \qquad (14.3)$$

где $x_{\text{эф}}$ — эффективные атмосферные осадки; $y_{\text{в}}$ — весенний поверхностный сток; $z_{\text{в}}$ — испарение в течение периода весеннего стока.

В связи с тем, что уравнение (14.3) не учитывает возможные потери влаги на насыщение пород зоны аэрации, результаты расчета инфильтрационного питания подземных вод являются несколько завышенными. Поэтому целесообразно этот метод применять для условий при относительно неглубоком залегании уровня подземных вод (5—20 м).

Для поисковой стадии работ величину ежегодного питания подземных вод за счет инфильтрации предвесенних атмосферных осадков приближенно можно определить по формуле (для месторождений с безнапорным уровнем):

$$Q_{\text{инф}} = \frac{M_1 \alpha F}{T}, \qquad (14.4)$$

где M_1 — количество осадков в зимне-весенний период; F — площадь распространения водоносного горизонта; $T = 365$ сут; α — коэффициент инфильтрации атмосферных осадков, определенный по аналогии с изученным районом.

Гидродинамический метод для общей оценки питания подземных вод по данным режимных наблюдений может быть применен при разведке месторождений подземных вод. Его сущность состоит в определении параметров

питания подземных вод по данным стационарных наблюдений за режимом уровня подземных вод в скважинах опытного участка с использованием уравнений неустановившейся фильтрации грунтовых вод по методу конечных разностей, предложенному Г. Н. Каменским. В реальных условиях поисково-разведочных гидрогеологических работ этот метод применяется редко.

Из балансово-гидрометрических методов в практике разведочных работ широко применяется метод оценки естественных ресурсов подземных вод по суммарной величине родникового стока. На некоторых месторождениях подземных вод очень четко фиксируется на поверхности зона естественной разгрузки в виде крупных родников (например, на месторождениях конусов выноса, трещинно-карстовых вод и др.). При таких природных условиях оценку естественных ресурсов подземных вод можно выполнить по величине суммарного дебита родников в зоне их разгрузки, хотя последний не всегда отражает реальное их значение, особенно в аридных зонах, где испарение влаги на участках выхода родников достигает больших объемов. С этой целью в зоне естественной разгрузки подземных вод должны быть организованы стационарные наблюдения за режимом дебита родников.

Согласно требованиям Инструкции ГКЗ СССР [15], результаты режимных наблюдений за дебитом родников могут быть непосредственно использованы для оценки собственно эксплуатационных запасов подземных вод. Минимальный среднесуточный дебит родников 95 %-ной обеспеченности, установленный режимными наблюдениями, может быть отнесен к категории эксплуатационных запасов А, если наблюдения проводились более трех лет, и к категории В, если изучение режима родников проводилось не менее года, при условии, если эксплуатация намечена путем прямого каптирования родников.

Гидрометрический метод оценки естественных ресурсов подземных вод разведочного участка основан на определении разности расхода реки в двух гидрометрических створах. При этих замерах один наблюдательный створ должен быть расположен выше по потоку реки от разведочного участка, а второй — ниже. Зафиксированное при этом изменение расхода поверхностных вод между потоками может быть равно значению подземного стока из дренируемого продуктивного горизонта. При стационарном изучении режима подземного стока в реки для оценки естественных ресурсов целесообразно использовать среднегодовые его значения. Рассматриваемый метод определения расхода подземного стока, хотя и является простым, однако для успешного его использования наблюдательные гидрометрические створы должны быть размещены таким образом, чтобы разность замеренных в них расходов потока превышала суммарную величину погрешностей измерения.

Большое значение для решения практических задач имеют

гидрологические методы оценки естественных ресурсов подземных вод. Из группы этих методов наиболее широко распространен метод расчленения гидрографа реки для гидравлически связанных с рекой горизонтов, который применяется главным образом для оценки естественных ресурсов подземных вод в региональном плане. Оценка естественных ресурсов подземных вод по этому методу выполняется на основе обработки имеющихся материалов (иногда дополнительных полевых материалов) по гидрогеологии и гидрологии.

Сущность этого метода заключается в построении гидрографа внутригодового речного стока и выделении на графике подземной составляющей, которая характеризует величину естественных ресурсов подземных вод. В зависимости от условий дренирования речной долины тех или иных распространенных в районе водоносных горизонтов и степени гидравлической связи подземных и поверхностных вод, подземная составляющая речного стока может характеризовать естественные ресурсы как грунтовых, так и напорных вод зоны дренирования речной сетью.

При оценке естественных ресурсов подземных вод в региональном плане обычно рассчитывается модуль подземного стока — расход подземного потока с единицы площади распространения водоносного горизонта. Среднегодовой модуль подземного стока $M_п$ можно оценить по следующей зависимости:

$$M_п = \frac{1000Q_п}{FT}, \qquad (14.5)$$

где $Q_п$ — годовой подземный сток, определенный по гидрографу, F — площадь водоносных горизонтов, распространенных в пределах изучаемого бассейна; T — время в годовом исчислении.

Если построить для района исследований карту подземного стока (выраженного в миллиметрах слоя воды), то для любой площади водосборного бассейна (например, для площади детальных поисковых работ) естественные ресурсы подземных вод могут быть определены по следующей зависимости:

$$Q_{ер} = 2{,}74 \cdot hF, \qquad (14.6)$$

где $Q_{ер}$ — естественные ресурсы подземных вод; h — слой подземного стока; F — оцениваемая площадь, в пределах которой формируются естественные ресурсы подземных вод.

Если карта подземного стока представлена в изолиниях модуля подземного стока, то естественные ресурсы подземных вод могут быть определены, исходя из следующей зависимости:

$$Q_{ест} = 86{,}4 \cdot M_п F, \qquad (14.7)$$

где F — площадь водосбора подземных вод.

Оценка естественных ресурсов подземных вод по методу расчленения гидрографа рек достаточно подробно изложена в работах Б. И. Куделина, И. С. Зекцера, В. А. Всеволожского, И. Ф. Фиделли и др.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как отмечалось, для некоторых типов месторождений подземных вод естественные запасы играют существенную роль в формировании собственно эксплуатационного дебита водозаборного сооружения. Так, например, на площади месторождений грунтовых вод древних широких речных долин Казахстанского типа (месторождения в долине р. Джона), где поверхностный сток действует весьма редко (один раз в 7—9 лет), в песчаной толще аллювиальных отложений естественные запасы формируются в значительном объеме. Отдельные водозаборные сооружения в этих условиях продолжительное время действуют на сработку естественных запасов грунтовых вод, которые периодически возобновляются за счет инфильтрации поверхностных вод.

На водозаборных сооружениях, расположенных на площади некоторых артезианских бассейнов платформенного типа, дебиты каптажных скважин формируются преимущественно за счет естественных упругих запасов подземных вод напорных горизонтов (до 65 %) — на водозаборах городов Харькова, Ленинграда и др.). При разведке таких типов месторождений возникает необходимость производить оценку естественных запасов подземных вод.

Емкостные (естественные) гравитационные запасы подземных вод на месторождениях с безнапорным уровнем для относительно однородного водоносного пласта можно определить по формуле:

$$Q_{зап} = V\mu, \tag{14.8}$$

где V — объем относительно однородного водоносного горизонта; μ — коэффициент водоотдачи.

С учетом неоднородного строения водоносного пласта

$$Q_{зап} = \sum_{i=1}^{n} \mu_i V_i, \tag{14.9}$$

где μ_i — коэффициент водоотдачи на отдельном участке; V_i — объем пласта на отдельном участке.

Для условий напорных вод с учетом упругого режима необходимо использовать показатель упругоемкости пласта и коэффициент упругой водоотдачи. Последний характеризует способность напорного пласта отдавать воду при снижении в нем пластового давления. Как безразмерный параметр он определяется по формуле

$$\mu^{\otimes} = V_в/V_д, \tag{14.10}$$

где $V_в$ — объем гравитационной воды; $V_д$ — объем депрессионной воронки.

Объем упругих запасов в напорном пласте может быть определен по формуле

$$Q_{упр} = \mu^{\otimes} V_д, \tag{14.11}$$

или

$$Q_{\text{упр}} = \beta^{\otimes} S_{\text{ср}} \pi R^2 m_{\text{ср}}, \qquad (14.12)$$

где — $V_{\text{д}} = \pi R^2 S_{\text{ср}}$; $\beta^{\otimes}$ — коэффициент упругоемкости пласта, равный $\mu^{\otimes}/m_{\text{ср}}$; $m_{\text{ср}}$ — средняя мощность напорного водоносного горизонта; $S_{\text{ср}}$ — средневзвешенное понижение напора в пределах депрессионной воронки; R — радиус депрессионной воронки.

Величину $S_{\text{ср}}$ можно определить из следующей зависимости:

$$S_{\text{ср}} = \frac{0,434 S_0}{\ln (R_{\text{п}}/r_{\text{с}})}, \qquad (14.13)$$

где S_0 — понижение уровня (пластового давления) в скважине в момент времени t на расстоянии r от скважины радиусом $r_{\text{с}}$ при квазистационарном режиме фильтрации; $R_{\text{п}}$ — приведенный радиус влияния скважины.

Глава 15

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ТРЕБОВАНИЯ К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Основные принципы и требования к оценке эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов пресных подземных вод четко определяются содержанием действующих в настоящее время Классификации [16] и Инструкции ГКЗ СССР [14].

В Классификации [16] в этом отношении отмечается, что эксплуатационные запасы подземных вод подсчитываются и учитываются по результатам проведенных на месторождении разведочных гидрогеологических работ, а также по гидрогеологическим данным, характеризующим опыт эксплуатации подземных вод на действующих водозаборах. Далее подчеркиваются очень важные положения о том, что данные об эксплуатационных запасах подземных вод предназначаются для использования: а) при разработке долгосрочных государственных планов экономического и социального развития СССР; б) при планировании разведочных гидрогеологических работ; в) по отдельным месторождениям, подготавливаемым для промышленного освоения — для проектирования конкретных водозаборных сооружений.

Эксплуатационные запасы подземных вод подсчитываются и учитываются в кубических метрах в сутки. Изученность месторождений должна обеспечивать достоверную оценку эксплуатационных запасов подземных вод, их качества и гидрогеологические условия эксплуатации, при обязательном соблюдении требований по охране окружающей среды.

Сущность подсчета эксплуатационных запасов пресных подземных вод состоит в определении их количества, которое может быть получено на месторождении с помощью рациональ-

ных в технико-экономическом отношении водозаборных сооружений при заданном режиме эксплуатации и качестве воды, удовлетворяющем требованиям ГОСТа в течение всего расчетного срока водопотребления. При этом во всех случаях подсчет эксплуатационных запасов пресных подземных вод производится применительно к существующей в данном районе водохозяйственной обстановке (наличие в районе водохранилищ, каналов и др.). В случае, если по району разведки имеются разработанные проекты изменения водохозяйственной обстановки, необходимо произвести прогнозную оценку возможного влияния намеченных мероприятий на работу водозабора и оценку запасов.

Подсчет эксплуатационных запасов подземных вод для целей орошения земель, а также в других случаях, предусматривающих неравномерное водопотребление в течение года, согласно требованиям Инструкции ГКЗ СССР [14], должен производиться по двум вариантам: для условий непрерывного равномерного водоотбора и для заданного водопотребителем режима эксплуатации; суммарный годовой отбор подземных вод при этом в обоих вариантах должен быть принят одинаковым.

Во всех случаях при подсчете эксплуатационных запасов подземных вод в районах, где уже имеются действующие водозаборы, необходимо определить возможное влияние работы намеченного нового водозабора на разведочном участке.

Если в прогнозе разведки нового месторождения или переоценке запасов на площади действующего водозабора, возникла необходимость применения метода искусственного восполнения подземных вод, подсчет эксплуатационных запасов должен производиться применительно к намечаемой схеме каптажного сооружения, включая при этом сооружения для искусственного подпитывания.

Важные требования в Инструкции ГКЗ СССР [14] предъявляются к подсчету запасов подземных вод на тех месторождениях, где их эксплуатационные возможности обеспечиваются за счет привлечения поверхностных вод или родниковым стоком. В этих случаях при подсчетах запасов должна приниматься дифференцированная вероятность превышения среднегодовых, среднемесячных и среднесуточных расходов (уровней) воды поверхностных источников в зависимости от категорий системы водоснабжения по надежности подачи воды: для I категории — 95 %, для II — 90 % и III — 85 %.

При выборе расчетных значений расхода поверхностных вод следует учитывать необходимость сохранения в водотоке на площади разведочного участка минимального санитарного расхода, если этого потребуют государственные органы по регулированию использования и охране вод, а также Государственного санитарного надзора.

Не менее важным положением Инструкции ГКЗ СССР [14] является требование об оценке эксплуатационных запасов прес-

ных подземных вод, выявленных в процессе гидрогеологических исследований при разведке месторождений твердых полезных ископаемых в районах, где месторождения находятся в очень сложных гидрогеологических условиях и имеют высокую степень обводнения. Подсчет выявленных при этом эксплуатационных запасов подземных вод, пригодных для использования в питьевых и технических целях, должен быть выполнен в соответствии с требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14], применительно к проектной схеме дренажных систем, предусмотренных с целью осушения горных разработок будущего горнорудного предприятия.

Результаты оценки эксплуатационных запасов подземных вод в отчетах должны быть отражены на подсчетных планах и разрезах. На графических приложениях должны быть показаны: 1) контуры площади разведочного участка, по которой произведен подсчет эксплуатационных запасов подземных вод (для небольших месторождений подземных вод границы контуров подсчета могут совпадать с границами самого месторождения; для месторождений, где продуктивный горизонт имеет большую площадь распространения, в качестве условной границы контура подсчета можно принять изолинии расчетного понижения уровня на конец срока эксплуатации, составляющие 10 % от понижения в центре депрессионной воронки); 2) изолинии расчетных понижений уровней воды в плане и кривые депрессии на гидрогеологических разрезах на конец расчетного срока эксплуатации водозабора; 3) существующие и проектируемые буровые скважины, принятые в обосновании оценки эксплуатационных запасов; 4) цифры подсчитанных эксплуатационных запасов подземных вод раздельно по категориям.

Масштабы подсчетных планов могут быть определены радиусом прогнозной воронки депрессии. Если выбранный масштаб не позволяет отразить на подсчетных планах расположения существующих и проектируемых скважин на водозаборном участке и категории запасов, обоснованных этими скважинами, то к отчету должна быть приложена крупномасштабная врезка деталей разведочного участка.

Основные принципы оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Выше отмечалось, что завершающим этапом изучения месторождения подземных вод является оценка разведанных запасов. Очень важно при этом учитывать основные принципы оценки.

Наиболее существенным для оценки эксплуатационных запасов подземных вод основным гидродинамическим методом (см. гл. 16) является принцип фильтрационной схематизации гидрогеологических условий разведочного участка.

Сущность этого принципа состоит в том, что природная гидрогеологическая обстановка участка определенным образом должна быть преобразована в виде расчетной фильтрационной схемы. Такая схематизация позволяет использовать имеющиеся

для различных типовых фильтрационных схем математические решения для оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Рассмотрим основные положения типизации граничных условий водоносных пластов применительно к оценке эксплуатационных запасов подземных вод, имея при этом в виду, что методические приемы в этом вопросе подробно рассматриваются в курсе: «Динамика подземных вод», а также изложены в ряде опубликованных работ [4, 5, 7, 11, 20].

При построении расчетных схем необходимо, прежде всего, исходить из того, что водоносные пласты в естественных и нарушенных эксплуатационных условиях представляют собой единую физическую область, имеющую четко выраженные внешние и внутренние границы.

При схематизации геометрических очертаний области фильтрации необходимо оценить возможное влияние границ водоносного пласта на режим уровня подземных вод в эксплуатационных скважинах или их дебит. В работе [11] рекомендуется для приближенной оценки учитывать в расчетной фильтрационной схеме влияние тех границ пласта в плане, которые удовлетворяют условию $R_r \leqslant 3\sqrt{at}$, где R_r — расстояние от водозабора до соответствующей границы пласта; a — уровнепроводность (пьезопроводность) пласта; t — расчетный срок работы водозабора.

В реальных природных условиях границы фильтрационного потока могут иметь очень сложные очертания в плане и разрезе. Однако для аналитических расчетов они могут быть трансформированы в следующие, часто встречающиеся на практике, типовые расчетные схемы (рис. 43): пласт неограниченный в плане (природные границы которого находятся за пределами возможного их влияния на режим водозабора); пласт полуограниченный (расчетная схема, в которой одна из границ области фильтрации может оказывать влияние на режим водозабора); ограниченный пласт (когда две параллельные границы

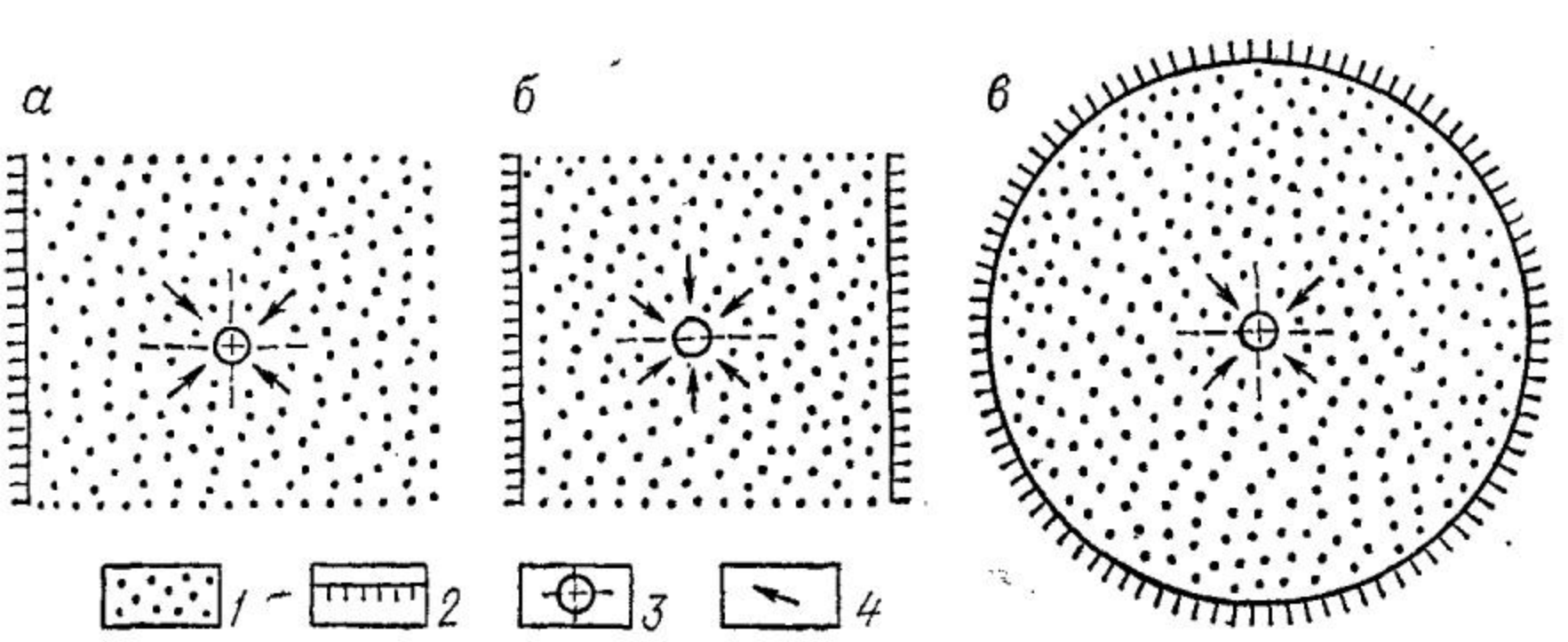


Рис. 43. Типовые простейшие схемы водоносных пластов в плане.

а — полуограниченный пласт; *б* — пласт-полоса; *в* — пласт с круговым контуром. *1* — водоносные породы; *2* — контур пласта; *3* — скважина; *4* — направленне потока

пласта влияют на режим работы эксплуатационных скважин); пласт-круг (обычно область фильтрации небольших размеров с замкнутой границей, которая повсеместно оказывает влияние на работу водозабора).

Одновременно со схематизацией природных границ области фильтрации необходимо выполнить и схематизацию начальных и граничных условий пласта.

Начальные условия отражают закономерности распределения на границах и внутри области фильтрации напоров или расходов в естественной обстановке (до начала эксплуатации водозабора). Граничные условия отражают особенности режима подземных вод: режим питания путем инфильтрации атмосферных осадков, связь с поверхностными водами и со смежными водоносными горизонтами.

Таким образом, начальные и граничные условия продуктивного водоносного горизонта являются принципиально важными факторами, которые необходимо учитывать при прогнозной оценке эксплуатационных запасов подземных вод. В работе [11] подчеркивается, что при решении прогнозных задач по оценке эксплуатационных запасов в качестве начального условия в большинстве случаев можно принять постоянное (независимое от времени) положение уровня подземных вод продуктивного пласта. Такое допущение является вполне оправданным, так как амплитуда естественных колебаний уровня чаще всего значительно меньше расчетного значения уровня при эксплуатации.

Исключение из этого составляют такие месторождения, на площади которых амплитуда колебаний уровня подземных вод в естественных условиях изменяется от нескольких до 10 м и более (некоторые месторождения трещинно-карстовых вод, подземных вод речных долин и др.).

Граничные условия пласта при схематизации области фильтрации обычно учитываются в плане (на боковых границах) и в вертикальном разрезе (на верхней и нижней границе водоносного пласта).

Различают следующие основные граничные условия продуктивного горизонта в плане [11].

1. Граничные условия I рода, характеризующие зависимость напора H на границе от ее координат x, y и времени t

$$H = f(x,\ y,\ t), \tag{15.1}$$

Гидрогеологическая обстановка, отражающая условия первого рода, может быть выявлена, например, на месторождениях, где подземные воды имеют тесную гидравлическую связь с поверхностными водами — водотоками рек, водоемами, каналами и т. д. В таких условиях границу продуктивного горизонта в плане можно принять с постоянным напором (если расход реки или канала больше, чем проектный дебит водозабора).

2. Граничные условия II рода, выражающие зависимость нор-

мальной к границе скорости фильтрации (или удельного расхода) от координат границы (x, y) и времени t:

$$q = f(x,\ y,\ t). \tag{15.2}$$

Эти условия характерны для продуктивного водоносного горизонта, который имеет границы с горными породами слабой водопроницаемости. Особенность такого контакта состоит в том, что любое понижение уровня подземных вод на границе области фильтрации не влияет на величину расхода потока на этой границе. Такие гидрогеологические условия могут быть выявлены, например, на месторождениях подземных вод речных долин, где водоносный горизонт аллювиальных отложений в плане непосредственно контактирует с коренными слабопроницаемыми породами. В этом случае при прогнозной оценке эксплуатационных запасов коренные породы можно принять как непроницаемый контур с расходом на границе, равным нулю.

3. Граничные условия III рода, определяющие зависимость между удельным расходом q и напором H или ΔH:

$$q = f(\Delta H), \tag{15.3}$$

где ΔH — представляет разность напоров в продуктивном водоносном горизонте и на внешней границе или в другом смежном горизонте.

Такие гидрогеологические условия могут быть выявлены, например, на месторождениях речных долин, где напорные воды при работе водозабора могут иметь связь с вышележащим горизонтом грунтовых вод и поверхностных вод через разделяющие слабопроницаемые слои.

4. Граничные условия IV рода, отражающие условия непрерывности и равенство напоров и скорости фильтрации на границах слоев с различной проницаемостью. Характерным в этом отношении примером может быть месторождение подземных вод речных долин, на площади которых продуктивный водоносный горизонт аллювиальных отложений непосредственно залегает на водоносных карбонатных породах, при этом напоры подземных вод двух водоносных горизонтов имеют одинаковую отметку.

Следует подчеркнуть, что при некоторых гидрогеологических условиях в процессе эксплуатации подземных вод может произойти изменение граничных условий. Такие изменения, например, могут произойти на водозаборных участках, когда на границе пласта происходит естественная нагрузка подземных вод в виде родников.

В первый период эксплуатации водозабора напор подземных вод на границе родников будет сохраняться, а их дебит будет постепенно уменьшаться, т. е. расход на границе потока будет изменяться во времени. В последующий период при превышении расхода водозабора над дебитом родников родники будут

полностью сдренированы и на границе начнет уменьшаться напор. При такой гидрогеологической обстановке эксплуатации условия I рода в первый период эксплуатации водозабора изменятся на граничные условия II рода во второй период эксплуатации.

Одним из основополагающих принципов является принцип категоризации эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов пресных подземных вод. Согласно действующей Классификации [16] эксплуатационные запасы подземных вод по степени изученности подразделяются на разведанные — категории А, В, С и предварительно оцененные — категории C_2; прогнозные эксплуатационные ресурсы по степени обоснованности относятся к категории Р.

Следующие основные факторы положены в основу выделения отдельных категорий эксплуатационных запасов подземных вод: а) степень изученности геологического строения и гидрогеологических условий месторождения; б) степень достоверности определения гидрогеологических параметров продуктивного горизонта и разделяющих слоев; в) степень изученности качества подземных вод; г) степень гидрогеологической подготовленности разведочного участка к промышленному его освоению; д) достоверность подсчета эксплуатационных запасов подземных вод.

В соответствии с этим положением в Классификации [16] предложены следующие условия отнесения разведанных запасов к той или иной категории.

Отнесение разведанных запасов к категории А должно удовлетворять следующим требованиям: мощность, строение и условия залегания водоносных горизонтов, положение уровней подземных вод, литологический состав и характер изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород по площади и разрезу, условия питания и характер взаимосвязи оцениваемых водоносных горизонтов с другими горизонтами и поверхностными водами изучены с детальностью, достаточной для достоверной количественной оценки источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и обоснования граничных условий, принимаемых при подсчете запасов; расчетные гидрогеологические параметры определены по данным опыта эксплуатации подземных вод на оцениваемом месторождении или по данным опытных откачек (выпусков); дана оценка изменчивости этих параметров по площади и разрезу; качество подземных вод изучено по всем показателям в соответствии с требованиями целевого использования их в народном хозяйстве; доказано, что в течение расчетного срока водопотребления качество вод будет постоянным или будет изменяться в допустимых пределах; условия эксплуатации подземных вод на разведочном участке должны быть изучены с детальностью, обеспечивающей получение исходных данных, необходимых для составления проекта разработки месторождения; эксплуатаци-

онные запасы подземных вод подсчитаны по фактическим и расчетным дебитам эксплуатационных выработок и опробованных опытными откачками (выпусками) разведочных выработок, дебитами родников, а в простых гидрогеологических условиях — дополнительно по расчетным дебитам проектных выработок, смежных с опробованными.

Разведанные запасы подземных вод, отнесенные к категории В, должны удовлетворять следующим требованиям: мощность, строение и условия залегания водоносных горизонтов, положение уровней подземных вод, литологический состав и характер изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород по площади и разрезу, условия питания и характер взаимосвязи оцениваемых водоносных горизонтов с другими горизонтами и поверхностными водами изучены с детальностью, позволяющей дать общую количественную оценку источникам формирования эксплуатационных запасов подземных вод, а также установить характер граничных условий, принимаемых при подсчете запасов; расчетные гидрогеологические параметры должны быть определены по данным опыта эксплуатации подземных вод или по данным опытных откачек (выпусков); установлены основные экономические изменения этих параметров по площади и разрезу; качество подземных вод необходимо изучить по всем показателям в соответствии с требованиями целевого использования их в народном хозяйстве; доказано, что в течение расчетного срока водопотребления качество вод будет постоянным или будет изменяться в допустимых пределах; условия эксплуатации подземных вод изучены в степени, обеспечивающей принципиальную оценку влияния этих условий на разработку месторождения; эксплуатационные запасы подземных вод подсчитаны по фактическим и расчетным дебитам эксплуатационных и разведочных выработок, дебитам родников, а в простых гидрогеологических условиях — дополнительно по расчетным дебитам проектных выработок в пределах обоснованной экстраполяции значений этих дебитов по площади.

Разведанные эксплуатационные запасы могут быть отнесены к категории C_1 при соблюдении следующих требований: мощность, строение и условия залегания водоносных горизонтов, положение уровней подземных вод, литологический состав и фильтрационные свойства водовмещающих пород по площади и разрезу выяснены в степени, позволяющей приближенно определить граничные условия, принимаемые при подсчете запасов; источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод определены также приближенно либо оценены по аналогии с разрабатываемыми или разведанными месторождениями; расчетные гидрогеологические параметры определены по данным опытных и пробных откачек (выпусков), приближенно выяснены основные закономерности изменения этих параметров по площади и разрезу; качество подземных вод, а также изменения его в течение расчетного срока водопотребления изучены в сте-

пени, обосновывающей возможность целевого использования вод в народном хозяйстве; условия эксплуатации подземных вод изучены в степени, позволяющей предварительно охарактеризовать основные особенности их эксплуатации; эксплуатационные запасы подземных вод на разведочном участке подсчитаны по ограниченному объему фактических геологических, гидрогеологических данных; в простых гидрогеологических условиях запасы могут быть оценены по расчетным дебитам проектных выработок, определенным на основании аналогии с примыкающими детально разведанными или разрабатываемыми участками месторождения, либо по экстраполяции данных, обосновывающих запасы более высоких категорий.

Для отнесения разведанных запасов к категории C_2 необходимо соблюдать следующие требования: геологическое строение и гидрогеологические условия месторождения подземных вод установлены в общих чертах по данным, полученным в единичных разведочных выработках, либо по аналогии с более изученными участками того же или другого подобного месторождения; качество подземных вод изучено по единичным пробам и отвечает требованиям целевого использования их в народном хозяйстве; эксплуатационные запасы подземных вод определены по расчетной производительности водозаборов на основании данных опробования единичных разведочных выработок, гидрогеологической аналогии или экстраполяции данных, обосновывающих запасы более высоких категорий.

Прогнозные ресурсы (категории Р) учитывают, согласно требованиям новой Классификации [16], возможность обнаружения на поисковых площадях новых месторождений подземных вод, предполагаемое наличие и масштаб которых основываются на общих гидрогеологических представлениях, теоретических предпосылках и на результатах проведения в артезианском бассейне, гидрогеологическом массиве или районе геологического и гидрогеологического картирования, гидрогеологических, воднобалансовых, геофизических и гидрохимических исследований. При количественной оценке прогнозных ресурсов подземных вод предполагаемых месторождений используются также данные опыта эксплуатации подземных вод аналогичных водоносных горизонтов на известных месторождениях в том же артезианском бассейне, гидрогеологическом массиве или гидрогеологическом районе.

В Классификации отмечается, что по значению в народном хозяйстве эксплуатационные запасы подземных вод подразделяются на две группы, подлежащие раздельному подсчету и государственному учету:

— балансовые, использование которых в настоящее время экономически целесообразно при существующей либо осваиваемой промышленностью прогрессивной технике и технологии добычи с соблюдением требований по рациональному использованию недр и охране окружающей среды;

— забалансовые, использование которых по тем или иным причинам в настоящее время экономически нецелесообразно, но которые могут быть в дальнейшем переведены в балансовые.

Принцип целевого назначения разведанных запасов по своему содержанию определяется практическим назначением разведанных запасов подземных вод: а) для целей хозяйственно-питьевого или промышленного водоснабжения; б) для целей орошения земель.

В первом направлении потребление воды осуществляется постоянно и непрерывно, с тем чтобы обеспечить бесперебойное снабжение объекта. Неравномерный отбор подземных вод при этом исключается. В связи с этим оценка эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном участке должна производиться для условий непрерывного и постоянного по расходу режима водоотбора.

Для целей орошения земель, как правило, предусматривается неравномерное по времени водопотребление — максимальный водоотбор в вегетативный период, и минимальный — в остальное время года. Нередко при этом допускается, что межвегетативный период отбора подземных вод на водозаборной площади вообще прекращается.

В тех случаях, когда на объекте орошения предусматривается неравномерное водопотребление в течение года, оценка эксплуатационных запасов подземных вод по результатам разведки должна производиться применительно к заданному режиму будущей эксплуатации. При этом к утверждению в ГКЗ СССР должны быть представлены запасы, которые соответствуют среднегодовой производительности водозаборного сооружения.

Принцип учета существующей природной и техногенной водохозяйственной обстановки состоит в строгом учете при оценке разведанных запасов природных и техногенных условий формирования основных источников эксплуатационных запасов подземных вод для данного конкретного водозаборного участка.

Выше отмечалось, что все возможные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод в общем случае могут быть охарактеризованы общим балансовым уравнением (см. гл. 1). Из этого уравнения следует, что изменение во времени и пространстве по тем или иным причинам режима основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод всегда может привести к изменению производительности водозабора. Поэтому в тех случаях, когда по площади месторождения имеются проектные решения по возможному изменению водохозяйственной обстановки (строительство водохранилищ, ирригационных или транспортных каналов и др.). которые могут изменить режим источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, оценка запасов должна производиться с учетом этих изменений.

Принцип обеспеченности разведанных запасов является одним из основных принципов оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Выше отмечалось, что эксплуатационные запасы подземных вод принято оценивать по производительности водозаборного сооружения. Обеспеченными запасами для данного разведочного участка следует считать те, при которых расчетное понижение уровня подземных вод в каптажных выработках $S_{рас}$ оказывается при оценке меньше так называемого допустимого понижения уровня $S_{доп}$ или равно ему, т. е. $S_{рас} \leqslant S_{доп}$. При этом величина $S_{доп}$ является очень важным технико-экономическим фактором. Величина допустимого понижения уровня устанавливается для каждого конкретного разведочного участка индивидуально с учетом особенности гидрогеологических условий, а также технико-экономических показателей.

Для подземных вод глубокого залегания от поверхности выбор общего допустимого понижения уровня лимитируется по существу только технико-экономическими расчетами.

Практика разведки и эксплуатации показывает, что для месторождений подземных вод с безнапорным уровнем значение допустимого понижения обычно принимается в среднем 50—70 % от общей мощности продуктивного водоносного горизонта. Для месторождений напорных подземных вод допустимое понижение уровня можно принять за величину напора (до кровли водоносного горизонта), а также до 50—70 % его мощности (если предусматривается частичное осушение пласта в процессе будущей эксплуатации).

Приведенные выше ограничения могут позволить получить в каптажных выработках некоторый резерв в понижении уровня подземных вод. Этот фактор является важным при выборе $S_{доп}$ на разведочных участках, имеющих, например, сложные гидрогеологические условия (сложные гидрохимические условия, высокую степень неоднородности пород продуктивного водоносного горизонта и др.). Важно при этом отметить следующее. При выборе значения $S_{доп}$ для месторождений подземных вод с безнапорным режимом необходимо изучить закономерности возможного изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород в вертикальном разрезе и опытным путем (опытными откачками) доказать возможность получения расчетного дебита скважины, принятого при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Данные эти могут служить хорошей основой для выбора значения $S_{доп}$ для данного конкретного разведочного участка.

Принцип учета сроков эксплуатации подземных вод. В практике разведки месторождений и оценки запасов подземных вод могут быть установлены различные сроки их эксплуатации.

В большинстве случаев, когда гидрогеологические условия месторождения четко определяют стабильный режим дебита

водозабора (запасы обеспечены питанием), эксплуатационные запасы подземных вод могут быть оценены либо на неограниченный срок, либо условно на расчетное время работы каптажного сооружения, равное 10 000 сут (около 27,4 года). Этот условный срок превышает амортизационный период работы водозабора и поэтому является достаточным для последующей переоценки запасов подземных вод по данным режима эксплуатации (стадия эксплуатационной разведки месторождений, см. гл. 9) либо для разведки возможных других источников водоснабжения данного объекта.

В некоторых случаях, как исключение из правил, оценка эксплуатационных запасов подземных вод может быть произведена на более короткий, заранее установленный водопотреблением расчетный срок эксплуатации водозабора. Этот прием на практике может быть использован, когда гидрогеологические условия месторождения не могут определить стабильный режим дебита водозабора на более длительный, чем установленный, срок эксплуатации. При таких гидрогеологических условиях эксплуатация месторождения заранее запланирована на истощение подземных вод.

Наконец, оценка эксплуатационных запасов подземных вод может быть произведена для целей орошения земель, при которой необходимо предусмотреть неравномерное водопотребление в отдельные периоды года. В связи с этим оценка запасов должна производиться по двум вариантам: а) при непрерывном режиме эксплуатации водозабора с учетом заданного водопотребления, что необходимо для государственного учета эксплуатационных запасов; б) при заданном режиме эксплуатации на длительность вегетационного периода.

Во всех случаях эксплуатационные запасы оцениваются на локальных участках месторождений применительно к наиболее рациональной для данных гидрогеологических условий схеме водозабора. Выбор рациональной схемы водозабора целесообразно производить совместно с заинтересованными проектными организациями с учетом данных технико-экономических показателей. В выбранной схеме водозабора должны быть указаны общее количество и система расположения эксплуатационных скважин, глубина их заложения, предельная глубина динамического уровня подземных вод в них и др.

В общих принципах оценки эксплуатационных запасов подземных вод существенное значение имеет принцип защиты окружающей среды, изменение которой может произойти под влиянием будущего отбора подземных вод на водозаборном участке.

Выше отмечалось, что отбор подземных вод, тем более системой крупных групповых водозаборных сооружений, всегда приводит к формированию на месторождении техногенных процессов. Под влиянием негативного воздействия этих процессов происходит ухудшение экологического качества геологической и нередко окружающей среды в целом.

Именно поэтому в современный период интенсивного отбора подземных вод из недр возникают требования о необходимости комплексного изучения месторождений подземных вод. В этот комплекс должны входить: а) традиционные задачи по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод; б) новые задачи по прогнозной оценке возможного изменения свойств окружающей среды на водозаборном участке в результате длительной эксплуатации подземных вод, а также, в случае необходимости, разработка рекомендаций по защите экологического качества биосферы.

Подготовленность разведанных месторождений подземных вод для промышленного освоения. В Классификации [16] изложены требования о степени подготовленности разведанных месторождений подземных вод к промышленному их освоению (подготовленность объекта к проектированию водозабора, строительству каптажного сооружения) и о рациональных условиях эксплуатации подземных вод.

Целесообразная степень изученности месторождения, степень подготовленности его к промышленному освоению четко определяется в основном двумя факторами: а) степенью сложности гидрогеологических условий; б) экономическими факторами (затратами средств и времени, требуемых на производство разведочных гидрогеологических работ). С учетом этих факторов все ранее выделенные месторождения подземных вод подразделены на три группы (см. табл. 7).

Для первой группы месторождений с простыми гидрогеологическими условиями представляется возможность экономически эффективной разведке выявить эксплуатационные запасы категории А.

Для второй группы месторождений со сложными гидрогеологическими условиями разведка эксплуатационных запасов категории А в большом количестве нецелесообразна из-за недостаточной эффективности и высокой стоимости геологоразведочных работ.

Именно поэтому для месторождений второй группы рекомендуется разведывать запасы в основном по категории В и частично по категории А.

Для третьей группы месторождений с очень сложными гидрогеологическими условиями выделение при детальной их разведке запасов категории А нецелесообразно, вследствие высокой стоимости и низкой эффективности разведки. Эксплуатационные запасы подземных вод этой группы месторождений рекомендуется разведывать в основном по категории В и частично по категории C_1.

Исходя из этих соображений разведанные месторождения считаются подготовленными для промышленного освоения при соблюдении следующих условий.

Балансовые разведанные запасы должны быть утверждены ГКЗ СССР или территориальными комиссиями по запасам по-

лезных ископаемых Министерства геологии СССР (ТКЗ) в следующих соотношениях различных категорий (табл. 16).

Таблица 16. Соотношение разведанных запасов подземных вод

Категория запасов	Группа сложности месторождений		
	первая	вторая	третья
А + В	80	80	70
А (не менее)	40	20	—
C_1	20	20	30

Утвержденные в установленном порядке указанные в таблице соотношения разведанных запасов используются для проектирования водозаборных сооружений. Эти соотношения различных категорий запасов должны быть достигнуты на участках водозаборов, намечаемых к строительству для удовлетворения заявленной первоочередной потребности в воде. Запасы для удовлетворения перспективной потребности в воде того или иного объекта должны быть разведаны на месторождении не ниже категории C_1.

В Классификации [16] отмечается следующее очень важное положение. Значительное превышение количества запасов, разведанных по категории А на месторождениях (или участках) первой и второй групп, по сравнению с указанным без должного обоснования нецелесообразно.

Что же касается возможности промышленного освоения разведанных месторождений (или участков) всех групп по сложности при меньших соотношениях балансовых запасов различных категорий по сравнению с указанными, то она устанавливается решением ГКЗ СССР (ТКЗ) при утверждении запасов на основе экспертизы материалов подсчета запасов. Качество подземных вод по всем трем группам месторождений должно быть изучено по всем показателям в соответствии с требованиями целевого использования их в народном хозяйстве. Доказано, что в течение расчетного срока водопотребления качество вод будет постоянным или будет изменяться в допустимых пределах по соответствующим ГОСТам.

В Классификации [16] также подчеркивается, что качество подземных вод месторождений, подготовленных к промышленному освоению, должно быть изучено по всем показателям в соответствии с требованиями целевого их назначения. Кроме того, должно быть доказано, что на весь срок водопотребления качество подземных вод будет постоянным или будет изменяться в допустимых пределах.

Требуется также произвести оценку возможного влияния проектируемого водозабора на работу действующих в районе месторождения каптажных сооружений.

Глава 16

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В настоящее время в практике разведочных гидрогеологических работ для оценки эксплуатационных запасов подземных вод применяются следующие методы: а) гидродинамический; б) гидравлический; в) балансовый; г) метод гидрогеологической аналогии, а также комплексный метод путем совместного применения перечисленных выше методов.

Гидродинамический метод оценки эксплуатационных запасов основан на решении задач о притоках подземных вод к водозаборным сооружениям, и прежде всего для типовых гидрогеологических условий, для которых имеются разработанные аналитические решения,основанные на уравнениях математической физики и теоретической гидродинамики. Исходные дифференциальные уравнения, описывающие фильтрационный поток и выведенные из них расчетные формулы для оценки запасов, являются достаточно строгими с физической и математической точек зрения. При разрешении проблем водоснабжения крупных потребителей обычно применяются групповые водозаборные сооружения. При этих условиях влияние водозабора распространяется на большие площади; можно считать, что на водозаборных участках формируется плановый фильтрационный поток. Поэтому гидродинамические расчеты оценки эксплуатационных запасов сводятся к обоснованию методики расчетов плановых фильтрационных потоков.

Сущность гидродинамического метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод заключается в расчетах производительности водозаборных сооружений применительно к той или иной рациональной схеме, отвечающей конкретным гидрогеологическим условиям разведочного участка. При этом учитываются начальные и граничные условия фильтрационного потока, а также параметры продуктивного водоносного горизонта в пределах рассматриваемой области фильтрации. В подавляющем большинстве случаев расчеты производятся при заданной производительности водозабора, где ограничивающим фактором является величина $S_{доп}$. В настоящее время разработаны гидродинамические расчеты для оценки эксплуатационных запасов подземных вод применительно к следующим наиболее распространенным типовым условиям (для контуров фильтрационных потоков в плане).

1. Гидрогеологические условия месторождения, отвечающие расчетной схеме «пласт = неограниченный в плане» (продуктивный горизонт в плане можно рассматривать как бесконечный, когда границы пласта удалены на большие расстояния от водозабора и не оказывают влияния на формирование режима уровня в водозаборных скважинах). Таким гидрогеологическим условиям отвечают, например, месторождения напорных вод на

площади артезианских бассейнов платформенного типа или месторождения грунтовых вод широких речных долин и др.

2. Продуктивный горизонт в плане на месторождении по условиям залегания отвечает схеме «полуограниченного пласта» (см. рис. 43, *а*). Эта типовая расчетная схема довольно часто встречается в практике разведочных гидрогеологических работ. Если разведочный участок располагается непосредственно вблизи одной из границ продуктивного пласта, а остальные границы находятся на расстоянии, превышающем влияние будущего водозабора, то в этих гидрогеологических условиях продуктивный горизонт отвечает типовой расчетной схеме «пласт-полуограниченный». Однако в этой типовой схеме необходимо учитывать качество границы пласта; она может, с одной стороны, характеризоваться постоянным напором (например, граница вблизи реки с постоянным расходом, озера или водохранилища); с другой стороны, граница пласта может иметь постоянный расход, например, на контакте с водонепроницаемыми породами. В первом случае при работе водозабора очень быстро формируется стационарный режим потока. Поэтому расчеты по оценке эксплуатационных запасов можно производить с использованием уравнений установившейся фильтрации. Если на разведочном участке отсутствуют условия перетекания подземных вод, будет формироваться нестационарный режим потока и расчеты по оценке разведанных запасов необходимо выполнять для условий неустановившейся фильтрации.

3. Продуктивный водоносный горизонт на площади разведочного участка может быть ограничен в плане двумя примерно параллельными границами. Такие гидрогеологические условия отвечают типовой расчетной схеме «пласт-полоса» (см. рис. 43, *б*). В этой типовой расчетной схеме продуктивный пласт может иметь: а) границы с постоянным напором (например, месторождение располагается в плане на междуречье двух рек, имеющих постоянные напоры), когда на водозаборном участке формируется стационарный режим фильтрации; б) границы с постоянными расходами (например, расположение разведочного участка по середине полосы распространения продуктивного горизонта, граничащего с двумя контурами водонепроницаемых пород), когда на водозаборном участке очень быстро формируется нестационарный режим фильтрации потока. Продуктивный водоносный горизонт, отвечающий типовой расчетной схеме «пласт-полоса», может иметь в плане разнородные по качеству границы: на одной из границ расход потока при эксплуатации водозабора не изменяется, а на другой изменяется, но напор сохраняется постоянным. Такие гидрогеологические условия могут быть отмечены, например, на месторождениях узких речных долин, когда коренной борт длины можно рассматривать как контур с постоянным расходом, а реку — как контур с постоянным напором.

4. Условия залегания продуктивного пласта в плане, отвеча-

ющие типовой расчетной схеме «пласт, ограниченный круговым контуром» (см. рис. 43, *в*). Такие гидрогеологические условия могут быть выявлены, например, на месторождениях трещинно-карстовых вод замкнутых бассейнов, имеющих небольшую площадь распространения, при этом границы контактирующих водонепроницаемых пород в плане могут иметь форму кругового контура (месторождения, приуроченные к ограниченным по площади антиклинальным структурам карбонатных пород,— см. гл. 3). Как и в предыдущих схемах, для типовых условий «пласт, ограниченный круговым контуром» могут быть отмечены два варианта: а) границы с постоянным напором (когда на водозаборном участке очень быстро формируется стационарный режим фильтрации); б) границы с постоянным расходом (когда на водозаборном участке формируется нестационарный режим фильтрации).

Следует иметь в виду, что в реальных гидрогеологических условиях на месторождениях подземных вод области фильтрации потока имеют в плане часто сложные геометрические очертания. Однако для оценки эксплуатационных запасов подземных вод, как показывает практика, вполне допустима их схематизация по типовым расчетным примерам, приведенным выше. Гидродинамический метод оценки эксплуатационных запасов по техническим условиям его применения подразделяется на: а) метод аналитических расчетов и б) метод математического моделирования на аналоговых (АВМ) или цифровых вычислительных машинах (ЭЦВМ).

Гидродинамический метод в практике разведочных работ целесообразно применять для оценки запасов месторождений первой и второй групп (см. табл. 7). Причем для сравнительно простых гидрогеологических и гидрогеохимических условий, когда граничные условия фильтрационного потока несложны в плане и разрезе, отмечаются сравнительно однородные фильтрационные и емкостные свойства продуктивного пласта, обычно применяются аналитические методы расчета. В этих условиях аналитические расчеты обеспечивают достаточную точность решения задач для практики. Для сложных граничных условий фильтрационного потока в плане и разрезе, сложных гидрогеохимических условий при наличии существенной неоднородности продуктивного горизонта для оценки разведанных запасов подземных вод целесообразно применять метод математического моделирования на современных электронных машинах. При использовании методов математического моделирования представляется возможность более надежно количественно оценить отдельные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

Гидродинамический метод оценки эксплуатационных запасов имеет большое преимущество перед всеми другими методами. Он основан на относительно строгих математических зависимостях и во многих случаях при его применении не требу-

ется дополнительных расчетов для оценки степени обеспеченности разведанных запасов. Однако по своей сути гидродинамический метод оценки не может быть применен для всех типов и разновидностей месторождений подземных вод. Оценку разведанных запасов подземных вод гидродинамическим методом целесообразно проводить по следующей технологической схеме.

1. Прежде всего, необходимо правильно осмыслить заявленную потребность в воде на текущую и далекую перспективу для данного объекта; заявленная потребность в воде и ее структура по существу определяют необходимость оценить общие эксплуатационные возможности разведываемого месторождения, а также общую производительность будущего водозаборного сооружения.

2. На основании анализа общей потребности и результатов разведки, по согласованию с проектными, заинтересованными организациями, производится уточнение ранее выбранной рациональной в технико-экономическом отношении схемы водозаборного сооружения на разведочном участке (схема расположения каптажных скважин, их количество, расстояние между скважинами, производительность, глубина и конструкция).

3. Производится тщательный анализ результатов проведенных поисково-разведочных работ и материалов предыдущих исследований, на основании которого должны быть составлены детальные специализированные гидрогеологические карты разведочного участка (карта гидроизогипс, карта проводимости пласта и др.).

На детальных картах должны быть отражены основные закономерности геологического строения разведочного участка; условия залегания и распространения продуктивного и смежных водоносных горизонтов, а также слабопроницаемых и водонепроницаемых пород; гидрогеологические параметры и закономерности их изменения в плане и разрезе; условия изменения качества подземных вод; основные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод и др. На основании анализа детальных карт должны быть установлены степень сложности гидрогеологических условий месторождения применительно к требованиям обобщающей группировки (см. табл.7) и принадлежность данного месторождения к той или иной группе.

4. На основании детальных карт должна быть составлена гидрогеологическая схема, отражающая природные условия и учитывающая условия на границах оцениваемой территории, закономерности изменения в плане фильтрационных и емкостных параметров водоносных и слабопроницаемых толщ. В гидрогеологической схеме необходимо также отразить структуру области фильтрации в вертикальном разрезе, которая определяется наличием на месторождении одного или нескольких водоносных горизонтов, литологическим составом разделяющих их толщ, а также геометрическими очертаниями границ области фильтрации в плане (влияние тектонических нарушений, условия связи

водоносных горизонтов с поверхностными водотоками и водоемами и т. д.).

5. Наиболее ответственным этапом гидродинамических расчетов по оценке разведанных запасов является составление расчетной схемы. Составляется она на основании анализа природных гидрогеологических условий площади разведочного участка. При этом в расчетных схемах должны учитываться только основные факторы, определяющие закономерности формирования эксплуатационных запасов подземных вод с учетом степени их обоснованности имеющимся фактическим материалом (отражаются на расчетной схеме граничные условия потока в плане и др.). При этом для оценки эксплуатационных запасов одного и того же месторождения может быть составлено несколько расчетных схем, характеризующихся различным учетом отдельных источников формирования запасов. Так, например, для оценки разведанных запасов промышленных категорий (А+В) в расчетной схеме должны быть учтены только надежно установленные основные источники их формирования, а для запасов категорий $А+В+С_1$ необходимо учесть источники формирования, которые установлены приближенно.

При составлении расчетной схемы целесообразно схематизировать природные условия разведочного участка следующим образом: геометрические очертания водоносных горизонтов в плане и разрезе (в том числе и продуктивного горизонта) трансформируются прямолинейными; при сложном строении водовмещающей среды многослойная их структура должна быть преобразована в одно-, двух или трехслойную, путем объединения водоносных горизонтов по гидрогеологическим признакам и др.; на основании характера и степени изменчивости фильтрационных и емкостных параметров продуктивного горизонта производится микрорайонирование площади разведочного участка по значениям водопроводимости и водоотдачи, а также обосновывается выбор средних значений параметров для последующих расчетов. На расчетной схеме также должны быть отражены условия на границах продуктивного и смежного с ним водоносных горизонтов, условия питания и естественной разгрузки подземных вод.

6. На основании анализа гидрогеологических условий разведочного участка и результатов опытно-фильтрационных работ необходимо обосновать выбор для данного объекта величины допустимого понижения уровня $S_{доп}$.

7. Исходя из разработанной для разведочного участка расчетной схемы, необходимо выбрать известный типовой метод оценки и типовые расчетные уравнения.

Собственно расчеты по оценке эксплуатационных запасов подземных вод целесообразно выполнять следующим образом. Исходя из требуемой производительности водозабора и возможного дебита каждой скважины предварительными расчетами определяется общее количество водозаборных скважин,

система их расположения на разведочном участке и расстояния между ними, с учетом границ изученной площади. Применительно к выбранной схеме водозабора проводится определение расчетной величины понижения уровня $S_{рас}$ в водозаборах, которое сравнивается со значением для данных условий допустимого понижения уровня $S_{доп}$. Если расчетное понижение не будет превышать значение допустимого, эксплуатационные запасы подземных вод для данного разведочного участка могут считаться обеспеченными. В этом случае целесообразно провести дополнительный расчет для определения максимально возможного дебита при заданном допустимом понижении. При проведении расчетов может либо учитываться реальное положение скважин и их количество, либо при большом числе скважин они объединяются в так называемые обобщенные системы («большие колодцы»).

В тех случаях, если на площади разведочного участка могут быть распространены подземные воды некондиционного состава, необходимо выполнить прогноз времени возможного подтягивания контуров некондиционных вод (в плане и разрезе) к водозаборным скважинам, а также определить результирующую концентрацию в воде элементов, содержание которых лимитируется соответствующими ГОСТами. Если содержание каких-либо компонентов будет превосходить допустимые нормы, эксплуатационные запасы, подсчитанные без учета возможных изменений качества, должны быть уменьшены до величины, определяющей сохранение качества воды в требуемых кондициях. Как следует из вышеизложенного, гидродинамические методы не являются простым использованием соответствующих типовых решений математических уравнений. Наиболее важным и ответственным этапом в общей технологии оценки запасов является схематизация природных условий, которая по существу определяет обоснованность применения тех или иных типовых решений.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Для аналитических расчетов производительности водозаборных скважин в типовых условиях используется общая теория взаимодействующих скважин, позволяющая определить понижение уровня в любой точке пласта. Чаще всего определяется понижение уровня подземных вод в центре водозаборного участка.

Рассмотрим типовые аналитические зависимости оценки эксплуатационных запасов подземных вод применительно к дискретному расположению скважин на водозаборном участке и обобщающей системе (системе «большого колодца»).

Для дискретного расположения скважин, когда число взаимодействующих скважин на водозаборном участке не превышает 8—10, аналитические расчеты являются сравнительно простыми. При бо́льшем числе скважин расчеты усложняются

и являются очень трудоемкими. В этом случае аналитические расчеты целесообразно производить для условий обобщенных систем.

Сущность приема обобщенных систем, как отмечает Ф. М. Бочевер, состоит в том, что реальные группы взаимодействующих скважин заменяются бесконечным множеством линейных источников с постоянным расходом, равномерно распределенным по линии или по площади, приблизительно соответствующим действительному расположению скважин. Суммарный расход этих источников принимается равным расходу реальных скважин.

Таким путем большое количество взаимодействующих скважин на групповых водозаборах заменяется одним укрупненным каптажным сооружением, например, галереей или «большим колодцем». Тогда представляется возможность определить расчетное понижение уровня подземных вод при заданной производительности водозабора в центре «большого колодца», что является вполне достаточным для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Учитывая, что разведанные запасы, как правило, оцениваются на продолжительный срок эксплуатации, для аналитических расчетов можно применять уравнение для больших периодов времени после начала отбора.

Все нижеприводимые формулы в этом разделе записаны для условий напорного режима. При использовании этих зависимостей для расчета водозаборов, работающих в безнапорных и напорно-безнапорных пластах, расчетные уравнения могут быть преобразованы путем следующей замены:
для безнапорных

$$2mS = H^2 - h^2; \qquad (16.1)$$

для напорно-безнапорных

$$2mS = m(2H_l - m) - h^2, \qquad (16.1а)$$

где m — мощность напорного горизонта; S — понижение уровня подземных вод в напорном горизонте; H — мощность безнапорного горизонта; h — величина остаточного столба воды в безнапорном или напорно-безнапорном горизонте; H_l — первоначальный напор, отсчитываемый от подошвы напорного горизонта.

Преобразование для напорно-безнапорных пластов, приведенное выше, является строгим для установившегося движения и приближенным, но вполне применимым для практических расчетов для неустановившегося режима фильтрации. Этими преобразованиями можно пользоваться при условии, когда $at/R_0^2 \geqslant 3$.

Радиус «большого колодца» R_0 для различных систем расположения реальных скважин на разведочном участке можно определять по следующим зависимостям:

$R_0 = 0{,}2l$ — для линейного ряда скважин; (16.2)

$$R_0 = 0{,}1P$$ — для площадной системы; (16.3)

$$R_0 = R$$ — для кольцевой системы, (16.4)

где l — длина реального ряда скважин при линейной системе; P — периметр площади расположения скважин при площадной системе; R — радиус кольца, по которому расположены скважины при кольцевой системе.

На водозаборах, схематизированных в виде обобщенных систем «больших колодцев», общее расчетное понижение уровня при заданной производительности каптажа определяется по следующей формуле:

$$S_{рас} = S_{вп} + S_{ск}, \quad (16.5)$$

где $S_{вп}$ — понижение уровня в скважине, вызванное внешним воздействием работы системы скважин и зависящее от вида системы и граничных условий продуктивного горизонта; $S_{ск}$ — дополнительное понижение в той же скважине, зависящее от расположения скважин внутри системы, их несовершенства и расхода каждой скважины.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод для месторождений, разрез которых представлен однослойным водоносным горизонтом для условий неограниченного в плане водоносного горизонта и дискретно расположенных скважин. При эксплуатации совершенных скважин с постоянным дебитом в однородном неограниченном в плане и изолированном пласте, понижение уровня подземных вод в любой точке пласта, расположенной на расстоянии r от скважины, в момент времени t можно определить по уравнению Тейса (см. формулы (12.1) и (12.2)).

В некотором удалении от водозаборной скважины в зоне ее влияния будет формироваться квазистационарный режим фильтрации. Кривая депрессии будет иметь тот же вид, что и при установившемся режиме, т. е. будет подчиняться логарифмической зависимости и снижаться во времени параллельно самой себе. В. Н. Щелкачевым было показано, что на некотором расстоянии от водозаборной скважины $r = R_n$, понижение уровня воды незначительно, т. е. в пределах естественной годовой амплитуды колебания.

Эта величина R_n была названа приведенным радиусом влияния

$$R_n = 1{,}5\sqrt{at}. \quad (16.6)$$

Подставив значение R_n в формулу (12.2), получим уравнение для понижения уровня подземных вод в любой точке пласта

$$S = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{R_n^2}{r^2} = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{R_n}{r}. \quad (16.7)$$

Тогда понижение уровня подземных вод непосредственно в скважине $S_{ск}$ радиусом r_c можно определить по выражению

$$S_{ск} = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at}{r_c^2} = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{R_n}{r_c}. \qquad (16.8)$$

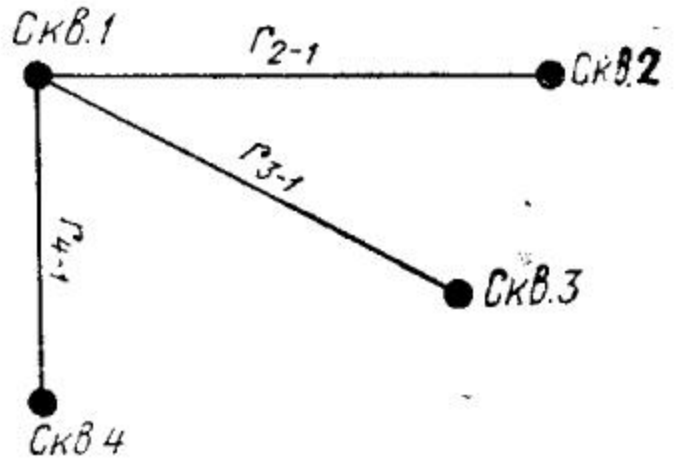


Рис. 44. Схема к расчету взаимодействующих скважии в неограничеином пласте

Оценку эксплуатационных запасов подземных вод по производительности водозабора, состоящего из группы взаимодействующих скважин можно выполнить, используя метод наложения течений (рис. 44).

Так как эксплуатация обычно производится длительное время, когда справедливым является логарифмическое преобразование функции $-E_i$, аналитические расчеты можно выполнить по формуле для условий квазистационарного режима фильтрации, если на водозаборном участке все взаимодействующие скважины пущены в эксплуатацию одновременно. При этих условиях расчетное понижение уровня подземных вод во взаимодействующей скважине можно определить по следующему уравнению:

$$S_{рас} = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{R_n}{r_c} + \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{2\pi km} \ln \frac{R_n}{r_i}, \qquad (16.9)$$

где Q_0 — дебит скважины, в которой определяется расчетное понижение уровня $S_{рас}$; Q_i — дебит i-й скважины ($i = 1, 2, 3\ldots$), взаимодействующей со скважиной, в которой производится расчет понижения уровня; r_c — радиус скважины, в которой определяется расчетное понижение уровня $S_{рас}$; r — расстояние от скважины, в которой рассчитывается уровень до i-й взаимодействующей с ней скважины; n — число скважин на водозаборном участке; t — расчетное время эксплуатации водозабора.

После несложных преобразований формулу (16.9) можно записать в более удобном для расчетов виде

$$S_{рас} = \frac{Q_{сум}}{2\pi km} \left(\ln R_n - \beta_0 \ln r_c - \sum_{i=1}^{n} \beta_i \ln r_i \right), \qquad (16.10)$$

где $Q_{сум}$ — суммарный (заданный) дебит водозабора, характеризующий эксплуатационные запасы разведочного участка:

$$\beta_0 = Q_0/Q_{сум}; \qquad \beta_i = Q_i/Q_{сум}. \qquad (16.11)$$

При разведке отдельных типов месторождений подземных вод и оценке на их площади эксплуатационных запасов гидро-

динамическим методом нередко возникает необходимость учитывать несовершенства разведочных скважин. Такие условия, например, могут иметь место при разведке месторождений подземных вод широких речных долин, где мощность продуктивного горизонта может быть довольно значительной.

Принято различать несовершенство разведочных скважин по степени и характеру вскрытия пласта. По первому признаку несовершенство обусловливается неполнотой вскрытия продуктивного пласта водоприемной частью скважины. В результате часть напора фильтрационного потока расходуется на преодоление дополнительного сопротивления.

Несовершенство по характеру вскрытия практически свойственно почти всем разведочным скважинам. Оно определяется рядом причин: несовершенной конструкцией фильтра, изменением естественной проницаемости пород вокруг ствола скважины при ее бурении и др. Несовершенство скважин обусловливает дополнительное понижение уровня.

Для условий неограниченного пласта понижение уровня воды в несовершенной скважине можно определить по формуле

$$S_{нс} = \frac{Q_0}{2\pi km}\left(\ln\frac{R_n}{r} + \xi_1 + \xi_2\right), \qquad (16.12)$$

где ξ_1 — дополнительное сопротивление скважины по степени вскрытия пласта; ξ_2 — то же, по характеру вскрытия.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод дополнительное сопротивление ξ_1 с достаточной точностью можно принять

$$\xi_1 = f(l_ф/m;\quad m/r), \qquad (16.13)$$

где $l_ф$ — длина водонапорной части фильтра; m — полная мощность водоносного горизонта; r — радиус скважины.

Значение ξ_1 определяется по графикам. Следует однако отметить, что надежной методики определения дополнительного сопротивления несовершенной скважины по характеру вскрытия пласта в настоящее время нет. Учитывая это обстоятельство, целесообразно при оценке эксплуатационных запасов учитывать значение общего гидравлического сопротивления, которое может быть найдено по данным опытных откачек:

$$\xi = \frac{2\pi km S_0}{Q_0} - \frac{1}{2} R_{сс}, \qquad (16.14)$$

где ξ — общее гидравлическое сопротивление несовершенной скважины; S_0 — понижение воды в опытной скважине; Q_0 — дебит опытной скважины; $R_{сс}$ — фильтрационное сопротивление, которое наблюдалось бы при движении воды к скважине, если бы она была совершенной.

Согласно В. М. Шестакову, несовершенство скважины может быть также учтено путем введения в расчет по формулам

совершенной скважины так называемого приведенного радиуса скважины r'_c:

$$r'_c = r_c e^{-\xi}, \tag{16.15}$$

где r_c — радиус реальной несовершенной скважины.

При оценке эксплуатационных запасов необходимо учитывать, что несовершенство скважин влияет на формирование воронки депрессии лишь на расстоянии от скважины, не превышающем значение мощности водоносного горизонта. Поэтому при расчетах дебита группы взаимодействующих скважин, расположенных на расстояниях, превышающих, как правило, мощность водоносного горизонта, поправки на несовершенство вводятся лишь при определении понижения уровня воды в самих скважинах, действующих как одиночные. При расчете срезок уровней несовершенством скважин можно пренебречь.

Согласно формуле (16.5) расчетное понижение уровня в центре «большого колодца» будет слагаться из понижения уровня в скважине, вызванного внешним воздействием системы в целом $S_{об}$, а также из величины дополнительного понижения уровня в той же скважине $S_{скв}$

$$S_{рас} = S_{об} + \Delta S_{скв}. \tag{16.16}$$

Расчетную зависимость для определения понижения уровня подземных вод в водоносном горизонте (не в скважине) $S_{об}$, формирующуюся под влиянием действия обобщенных систем («большого колодца») можно представить в следующем виде:

$$S_{об} = \frac{Q_{сум}}{4\pi km} R_{об}, \tag{16.17}$$

где $R_{об}$ — внешнее фильтрационное сопротивление, вызываемое действием обобщенной системы и зависящее от типа, размеров системы, условий на границах пласта, а также продолжительности работы скважины.

По формуле (16.17) можно произвести определение понижения уровня подземных вод в отдельных точках пласта и на самих участках расположения взаимодействующих скважин.

Величину дополнительного понижения уровня $\Delta S_{скв}$, вызванного сопротивлением конкретной скважины, можно определить по формуле

$$\Delta S_{скв} = \frac{Q_i}{4\pi km} \Delta R_{скв}, \tag{16.18}$$

где $\Delta R_{скв}$ — дополнительное сопротивление, зависящее от расположения скважин внутри системы и их несовершенства (так называемое внутреннее сопротивление).

Величину внешнего фильтрационного сопротивления $R_{об}$ при оценке разведанных запасов подземных вод в условиях неогра-

ниченного в плане пласта можно определить по следующей формуле:

$$R_{об} = \ln \frac{2{,}25at}{r_к^2}, \qquad (16.19)$$

где $r_к$ — радиус системы «большого колодца».

Для различных обобщенных систем скважин на водозаборном участке значение $r_к$ можно определить по формулам (16.2), (16.3), (16.4).

Определение $R_{об}$ по формуле (16.19) можно проводить при следующих условиях: для линейной системы, когда $at/r^2_к \geqslant 2{,}5$; для кольцевой системы, когда $at/r^2_к \geqslant 3{,}5$; и для круговой, когда $at/r^2_к \geqslant 4$.

Внутреннее гидравлическое сопротивление — $\Delta R_{скв}$ можно определить по зависимости (по Ю. П. Борисову)

$$\Delta R_{скв} = 2\left(\ln \frac{r_{пр}}{r_{скв}} + \xi\right), \qquad (16.20)$$

где $r_{пр}$ — приведенный радиус влияния данной скважины внутри обобщающей системы; ξ — гидравлическое сопротивление, вызываемое несовершенством данной скважины.

Величину $r_{пр}$ можно определить по следующим формулам:

а) для линейной и кольцевой систем при расстояниях между скважинами, равных $2в$:

$$r_{пр} = b/\pi; \qquad (16.21)$$

б) для площадной системы расположения скважин:

$$r_{пр} \doteq 0{,}47\sqrt{\frac{F_i}{\pi}}, \qquad (16.22)$$

где F_i — площадь круга, равная площади области вокруг i-й скважины, ограниченной линиями, проходящими между соседними скважинами.

При указанных выше условиях расчетное понижение уровня подземных вод в скважине, расположенной в обобщенной системе (например, в центре «большого колодца»), на конечный срок эксплуатации группового водозабора и при заданной общей его производительности (эксплуатационные запасы) можно определить по следующей зависимости:

$$S_{рас} = \frac{Q_{сум}}{4\pi km}(R_{об} + \beta_i R_{скв}), \qquad (16.23)$$

где

$$\beta_i = Q_{сум\,i}/Q_{сум}; \qquad (16.24)$$

$Q_{сум}$ — суммарная производительность группового водозабора (эксплуатационные запасы); Q_i — дебит скважины, в которой производится определение $S_{рас}$.

Если на площади месторождения подземных вод при оценке их эксплуатационных запасов расположен не один, а несколько взаимодействующих групповых водозаборов (обобщающих систем), то расчеты по определению $S_{рас}$ производятся по методу наложения фильтрационных течений. Для определения расчетного понижения уровня в этих условиях в любой точке пласта в любой момент времени можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$S_{об.\ рас} = \frac{Q_{сум}}{4\pi km} \sum_{i=1}^{n} \beta_i R_{об\ i}, \qquad (16.25—26)$$

где $Q_{сум}$ — суммарный расход взаимодействующих обобщенных систем (эксплуатационные запасы); $R_{об_i}$ — внешнее гидравлическое сопротивление i-й обобщенной системы ($i=1, 2, 3...$), работающей с суммарным дебитом $Q_{сум_i}$.

При оценке разведанных запасов подземных вод для типовых условий полуограниченного пласта чаще всего принимается расчетная схема, когда водозаборное сооружение расположено вблизи реки с постоянным напором или вблизи контакта водосодержащих пород с непроницаемыми породами. При этом граница продуктивного горизонта с рекой, как правило, рассматривается как граница с постоянным напором ($H=\text{const}$; $S=0$), а граница с непроницаемыми породами, как граница с постоянным расходом ($Q=0$).

Как в первом, так и во втором случае, расчетные зависимости для оценки разведанных запасов основаны на применении метода зеркальных отображений и метода наложения течений.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод на разведочном участке, где продуктивный горизонт имеет постоянно действующий источник питания (например, река, водохранилище и др.), гидродинамические расчеты производятся, как правило, по формулам установившейся фильтрации потока.

Для расчета дискретных взаимодействующих скважин, любым образом расположенных на площади разведочного участка (рис. 45), расчетное понижение уровня подземных вод будет складываться из S_0 в каждой скважине при работе ее как одиночной с деби-

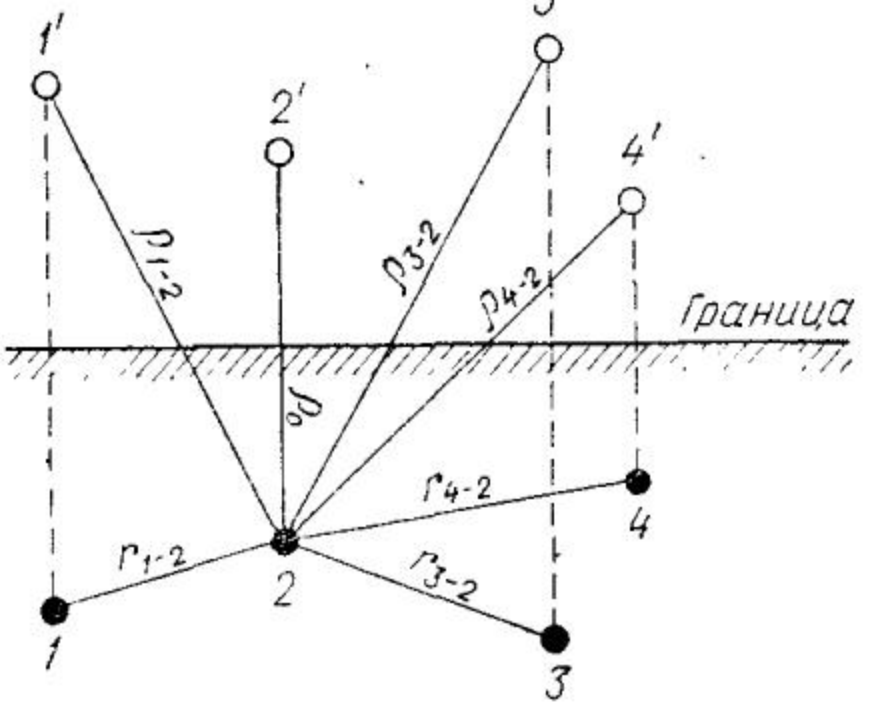


Рис. 45. Схема к расчету взаимодействующих скважин в полуограниченном пласте

1—4 — реальные скважины на площади разведочного участка; *1'—4'* — зеркальное отражение реальных скважин относительно границы

том Q_0 и срезки уровня ΔS_i, вызванной работой остальных скважин с дебитом Q_i.

Суммируя эти значения, полное понижение уровня при оценке эксплуатационных запасов подземных вод в расчетной скважине на участке можно определить по следующей зависимости:

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{\rho_0}{r_c} + \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i}{2\pi km} \ln \frac{\rho_i}{r_i} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \left(\beta_0 \ln \frac{\rho_0}{r_c} + \sum_{i=1}^{n} \times \right.$$

$$\left. \times \beta_i \ln \frac{\rho_i}{r_i} \right), \qquad (16.27)$$

где $Q_{\text{сум}}$ — суммарные эксплуатационные запасы подземных вод (заданная производительность водозабора в соответствии с заявленной потребностью); r_c, r_i — радиусы скважины, в которой определяется расчетное понижение уровня (обычно в центре водозабора); ρ_0 и ρ_i — расстояния от скважины, в которой определяется расчетное понижение уровня до ее зеркального отображения и расстояние до этой скважины от остальных зеркально отображенных скважин (см. рис. 45).

В условиях полуограниченного пласта с контуром постоянного напора водозаборные сооружения чаще всего представляются в виде линейного ряда скважин, расположенных параллельно руслу реки. При такой схеме понижение уровня подземных вод в каждой скважине ряда неограниченной длины (когда отношение $l_0/2l \leqslant 0{,}1$) при одинаковых дебитах скважины Q_0 и при одинаковых расстояниях между скважинами $2a$ может быть рассчитано по формуле Маскета-Лейбензона

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \left(\frac{1}{\pi n} \cdot \ln \frac{b}{\pi r_0} + \frac{l_0}{l} \right), \qquad (16.28)$$

где $Q_{\text{сум}}$ — суммарная производительность водозабора; l_0 — расстояние от ряда скважин до реки (с учетом значения ΔL); l — половина общей длины линейного ряда скважин; n — число скважин.

В случае, когда на разведочном участке линейный ряд скважин имеет ограниченную длину (отношение $l_0/2l > 1$), расчетное понижение уровня воды в центре ряда при определении эксплуатационных запасов можно определить по формуле В. М. Шестакова

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \left[F\left(\frac{l_0}{2l} + \frac{1}{n} \ln \frac{b}{\pi r_0} \right) \right]. \qquad (16.29)$$

Значения функции $F\left(\frac{l_0}{2l}\right)$ для различных значений $\frac{l_0}{2l}$ приведены ниже:

$\frac{l_0}{2l}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	5,0
$F\frac{(l_0)}{(2l)}$	0,18	0,31	0,40	0,48	0,55	0,66	0,77	0,98	1,12	1,27

Для расчетной схемы «граница с постоянным расходом» расчетное понижение уровня подземных вод, вызванное откачкой из одиночной скважины в любой точке пласта, будет слагаться из суммы понижений в реальной скважине S_1 и зеркально отображенной скважине ΔS_1, т. е.

$$S_{\text{рас}} = S_1 + \Delta S_1. \tag{16.30}$$

Снижение уровня в этом случае будет происходить в условиях неустановившейся фильтрации потока.

Находя значение S_1 и ΔS_1 при $\rho/(4at) \leqslant 0{,}1$ из формулы (12.2), получим

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{2{,}25at}{r\rho}. \tag{16.31}$$

Используя метод зеркальных отображений и метод наложения фильтрационных потоков для продуктивного пласта с нулевым расходом на границе, расчетное понижение уровня воды в каждой взаимодействующей скважине в групповом водозаборе можно определить по формуле

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km}\left(\beta_0 \ln \frac{2{,}25at}{r_c\rho_0} + \sum_{i=1}^{n} \beta_i \ln \frac{2{,}25at}{r_i\rho_i}\right). \tag{16.32}$$

Если на разведочном участке по принятой схеме водозабор состоит из большого количества скважин, то при оценке эксплуатационных запасов подземных вод в условиях полуограниченного пласта с закрытой (непроницаемой) границей расчеты целесообразно производить по методу обобщенных систем. Однако применение этого метода возможно, если соблюдаются следующие условия:

— для линейной системы расположения скважин $l_c > 2{,}5r_к$;

— для кольцевой системы $l_c > r_к$, (16.33)

где l_c — расстояние от границы пласта до ближайшей скважины водозабора.

При соблюдении этих условий —

$$R_{\text{об}} = 2 \ln \frac{1{,}13at}{l_0 r_к}, \tag{16.34}$$

где l_0 — расстояние от центра обобщенной системы до границы пласта.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод для условий ограниченных в плане пластов. В практике поисково-разведочных работ могут быть выявлены такие месторождения, гидрогеологические условия которых отвечают типовым расчетным схемам ограниченных в плане продуктивных водоносных горизонтов.

Ограниченные водоносные пласты могут при этом иметь прямолинейные и круговые границы. В первом случае будем

иметь расчетную схему «пласт-полоса», а во втором — «пласт-круг».

В этих расчетных схемах влияние прямолинейных границ при расчете водозаборов (оценка разведанных запасов) с постоянным напором или постоянным расходом учитывается действием зеркальных отображений этих водозаборов.

Для преобразования двух параллельных границ в расчетной схеме «пласт-полоса» зеркально отображенными скважинами или водозаборами теоретически необходимо бесконечное множество зеркальных отображений. Дело в том, что наличие на схеме второй границы определяет необходимость иметь последовательные отображения на ней не только реальных, но и всех отображенных на первой границе скважин. Однако каждое последующее из n принятых в расчет зеркальных отображений все меньше будет влиять на величину понижения уровня воды. Поэтому, как показал Ф. М. Бочевер, для коротких отрезков времени, когда $t \leqslant 2{,}5L^2/a$ (L — ширина полосы), можно пользоваться приближенным решением, учитывающим однократное отображение реальных скважин относительно каждой из границ «пласта-полосы».

Расчетная схема «пласт-полоса» отображает гидрогеологические условия, которые довольно часто встречаются в практике поисково-разведочных работ. Такие гидрогеологические условия могут иметь, например, место на месторождениях подземных вод в сравнительно узких речных долинах, на площади которых один прямолинейный контур может проходить по реке, имеющей постоянный поверхностный поток (границы с постоянным напором — H-const), а второй — по контакту аллювиальных водовмещающих пород с непроницаемыми породами коренных пород (контур с постоянным расходом $q=0$). При сочетании этих условий могут быть расчетные схемы, когда «пласт-полоса» имеет однородные границы (на обеих границах пласта H-const или $q = 0$) и разнородные границы (на одной границе H-const, а на второй $q = 0$).

Для гидрогеологических условий месторождения подземных вод, когда на двух границах пласта могут быть контуры с постоянным напором, на водозаборном участке сравнительно быстро наступает установившийся режим фильтрации потока. Такие условия могут быть выявлены, например, на площади крутой излучины реки. В условиях такой расчетной схемы «пласта-полосы» с двумя однородными границами H-const при подсчете эксплуатационных запасов подземных вод на длительный срок работы водозабора Ф. М. Бочевером была получена следующая расчетная зависимость взаимодействующих скважин, имеющих одинаковые дебиты:

$$Q_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km} \ln \frac{0{,}64L \cdot \sin \dfrac{\pi L_A}{L}}{r_c}, \qquad (16.35)$$

где Q_0 — дебит скважины, в которой определяется понижение уровня; L — расстояние между границами потока; L_A — расстояние от скважины до границы A; r_c — радиус скважины.

Зависимость (16.35) справедлива при $at/L^2 \geqslant 0{,}05$—$0{,}1$. Для гидрогеологических условий с однородными границами, отвечающими схеме «пласт-полоса» с постоянным расходом ($q=0$), (см. рис. 43, *б*) при оценке эксплуатационных запасов подземных вод можно использовать приближенное решение. При расположении длинного продольного ряда скважин с одинаковыми дебитами, расчетное понижение уровня воды в скважине можно определить по формуле

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km}\left(\ln\frac{r_{\text{кр}}}{r_c} + \frac{2at^*}{r_{\text{кр}}^2} - 0{,}75\right); \qquad (16.36)$$

$$r_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2bL}{\pi}}, \qquad (16.37)$$

где $r_{\text{кр}}$ — радиус круга равновеликого блока со сторонами b, L.

Если на разведочном участке, по гидрогеологическим соображениям, целесообразно разместить водозабор в виде поперечного ряда равнодебитных скважин, то понижение уровня в каждой взаимодействующей скважине можно определить по следующей зависимости:

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\left(\ln\frac{b}{2\pi r_c} + \frac{3{,}55\sqrt{at}}{b}\right), \qquad (16.38)$$

где b — расстояние между скважинами.

Для гидрогеологических условий «пласта-полосы» с разнородными границами — одна с постоянным напором, а вторая с постоянным расходом (см. рис. 42, *б*) — Ф. М. Бочевером было показано, что через более или менее продолжительное время эксплуатации подземных вод на водозаборе наступает стационарный режим фильтрации.

В этом случае расчетный уровень подземных вод во взаимодействующей скважине в продольном ряду водозабора с одинаковыми заданными дебитами можно определить по формуле

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\ln\frac{1{,}27\operatorname{ctg}\dfrac{\pi L_A}{L}}{r_c}, \qquad (16.39)$$

где L — ширина полосы.

Оценку эксплуатационных запасов подземных вод по заданному дебиту групповых водозаборов в полосовых пластах можно существенно упростить, если использовать метод обобщенных систем скважин. Применимость этого метода определяется условиями (16.39) и следующим соотношением:

$$t \geqslant 10\,(L + L_p)^2/a. \qquad (16.40)$$

При этих условиях значение $R_{об}$ — внешнего фильтрационного сопротивления, вызываемого действием обобщенной системы, может быть определено по следующим зависимостям:

а) для условий «пласта-полосы» с контурами постоянного напора

$$R_{об} = 2 \ln \frac{0{,}64L \cdot \sin \frac{\pi L_A}{L}}{r_к}; \qquad (16.41)$$

б) для условий «пласта-полосы» с непроницаемыми границами

$$R_{об} = 2 \left(\frac{3{,}55 \sqrt{at}}{L} + \ln \frac{0{,}16}{r_к \sin \frac{\pi L_A}{L}} \right); \qquad (16.42)$$

в) для условий «пласта-полосы» с разнородными границами

$$R_{об} = 2l \frac{1{,}27 \operatorname{ctg} \frac{\pi L_A}{L}}{r_к}. \qquad (16.43)$$

Гидрогеологические условия, отвечающие расчетной схеме «пласт-круг», могут быть выявлены, например, при разведке месторождений трещинно-карстовых вод, приуроченных к замкнутым артезианским бассейнам горно-складчатых областей и др. Очень часто на этих месторождениях водоносный продуктивный горизонт распространен на небольшой площади. Именно поэтому вскоре после начала работы водозаборных скважин все границы пласта начинают оказывать влияние на формирование воронки депрессии.

При таких условиях (ограниченных по площади водоносных пород) реальный контур продуктивного горизонта можно заменить примерно круговым контуром. В этом случае расчетная схема для оценки эксплуатационных запасов подземных вод может быть представлена в виде равновеликого «пласт-круга», радиус которого $r_{кр}$ может быть определен из соотношения

$$r_{кр} = \sqrt{F/\pi}, \qquad (16.44)$$

где F — площадь распространения продуктивного водоносного горизонта.

В зависимости от конкретных гидрогеологических особенностей месторождений в расчетной схеме «пласт-круг» могут быть различные граничные условия.

Чаще всего в практике поисково-разведочных работ встречаются такие месторождения, на контуре которых отмечаются границы с постоянным расходом (продуктивный горизонт контактирует со слабопроницаемыми породами). При этих усло-

виях движение подземных вод к водозаборному сооружению имеет четко выраженный нестационарный режим.

Для определения расчетного понижения уровня воды в любой точке пласта на расстоянии r от одиночной скважины, расположенной примерно в центре «пласта-круга», в любой момент времени может быть использована зависимость, предложенная М. Маскетом:

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\left(\ln\frac{r_{\text{кр}}}{r} + \frac{r}{r_{\text{кр}}} + \frac{2at}{r_{\text{кр}}} - 0{,}75\right). \qquad (16.45)$$

Эта формула справедлива при условии, когда $at/r_{\text{кр}} \geqslant 0{,}05$.

Если на месторождении подземных вод продуктивный пласт обнажается на поверхности, и таким образом существует область питания за счет инфильтрации атмосферных осадков, то с учетом притока естественных ресурсов со стороны области питания понижение уровня воды в скважине можно оценить по уравнению Бочевера

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\ln\frac{r_{\text{кр}}}{r} + \frac{(Q_0 - Q_{\text{с}})\,t}{\pi\mu^* r_{\text{кр}}^2}, \qquad (16.46)$$

где μ^* — упругая водотдача напорного горизонта $= km/a$.

Если в краевой части кругового замкнутого пласта распространены безнапорные воды, то с учетом сработки емкостных запасов подземных вод в безнапорной области

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\ln\frac{0{,}47\,r_{\text{кр}}}{r} + \frac{Q_0 t}{\mu F_1 + \mu^* F_2}, \qquad (16.47)$$

где μ — свободная водоотдача пород в безнапорной области пласта площадью F_1; F_2 — площадь распространения напорных подземных вод, при этом

$$r_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{F_1 + F_2}{\pi}}. \qquad (16.48)$$

С учетом использования естественных ресурсов

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_0}{2\pi km}\ln\frac{r_{\text{кр}}}{r} + \frac{(Q_0 - Q_{\text{с}})\,t}{\mu F_1 + \mu^* F_2}. \qquad (16.49)$$

Приведенные выше зависимости для одиночных скважин в расчетной схеме «пласт-круг» могут быть использованы и для оценки разведанных запасов группы взаимодействующих дискретных скважин по методу суперпозиций (наложение течений)

$$S_{\text{р}} = S_0 + \sum_{i=1}^{n} \Delta S_1. \qquad (16.50)$$

При определении S_0 в этих зависимостях вместо r следует применять значение $r_{\text{с}}$ (радиус скважины), при определении

ΔS_i применять Q_i вместо Q_0, а вместо r значение r_i. Этими зависимостями можно пользоваться и для определения $S_{об}$ при расчете групповых водозаборов по методу расчета обобщенных систем скважин.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом неоднородных слоистых пластов. Ряд месторождений подземных вод в вертикальном разрезе имеет неоднородное слоистое строение. Именно такими гидрогеологическими условиями характеризуются месторождения, приуроченные к площади артезианских бассейнов платформенного типа, когда в геологическом разрезе пород залегают несколько продуктивных водоносных горизонтов и несколько разделяющих их слоев слабопроницаемых пород. Слоистый разрез водовмещающих и разделяющих пород может иметь место и на крупных месторождениях артезианских бассейнов горно-складчатых областей (например, Араратский бассейн в Армении, Ферганский бассейн в Средней Азии и др.), а также на месторождениях конусов выноса.

Неоднородное строение литолого-геологического разреза оказывает большое влияние на формирование и величину эксплуатационных запасов подземных вод. Сущность этого влияния состоит в том, что через слабопроницаемые разделяющие слои происходит взаимодействие между продуктивными водоносными горизонтами путем перетекания подземных вод через слабопроницаемые пласты.

Теоретические основы перетекания в слоистых толщах были разработаны А. Н. Мятиевым и Н. К. Гиринским. Сущность теоретических положений состоит в следующем: в неоднородно-слоистом потоке движение подземных вод в продуктивных пластах происходит в горизонтальном направлении, а в слабопроницаемых пластах в вертикальном направлении.

Имеющиеся аналитические решения определения притока воды к скважине для условий многослойной среды являются приближенными, так как для упрощения решений был сделан ряд допущений. Основными являются следующие предпосылки: а) до начала откачки из скважины уровни гидравлически связанных водоносных горизонтов являются одинаковыми, что в природных условиях достигается редко; б) во время откачки из основного продуктивного горизонта уровень подземных вод в смежных водоносных горизонтах сохраняется постоянным; эта предпосылка может иметь место в природных условиях, если величина питания смежного водоносного горизонта является достаточной для балансирования с перетеканием.

Учитывая гидрогеологическую сложность процессов формирования депрессионной воронки при работе скважины в условиях неоднородных слоистых толщ и приближенные методы оценки притока воды к скважине, аналитические расчеты для оценки эксплуатационных запасов подземных вод (расчеты водозаборов) целесообразно выполнять только для схемы неограниченного в плане пласта, имеющего в кровле и подошве слабо-

проницаемые слои, через которые может происходить перетекание подземных вод. Во всех других случаях граничных условий фильтрационного потока в плане целесообразно для оценки разведанных запасов применять метод математического моделирования.

Для оценки величины понижения уровня воды в скважине в условиях перетекания для неограниченных в плане пластов можно пользоваться приближенным решением

$$S_{\text{скв}} = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{1,12B}{r_c}, \qquad (16.51)$$

где B — коэффициент перетекания, зависящий от значений водопроницаемости и мощности пластов.

Если перетекание подземных вод происходит через слои, залегающие выше и ниже основного продуктивного горизонта, то коэффициент перетекания будет равен

$$B = \sqrt{\frac{km}{(k_1/m_1) + (k_2/m_2)}}, \qquad (16.52)$$

где km — проводимость основного продуктивного горизонта; k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации слабопроницаемых пород, лежащих в кровле и подошве; m_1 и m_2 — мощности этих слоев.

Если на разведочном участке перетекание происходит только через кровлю или подошву продуктивного водоносного горизонта, то коэффициент B будет равен

$$B = \sqrt{km m_1/k_1}. \qquad (16.53)$$

Расчетное понижение уровня воды $S_{\text{рас}}$ в скважине группового водозабора приближенно можно определить из следующей зависимости:

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi km} \left[\beta_0 \ln \frac{1,12B}{r_c} + \sum_{i=1}^{n} \beta_i K_0\left(\frac{r_i'}{B}\right) \right], \qquad (16.54)$$

где K_0 — символ преобразованной функции Бесселя второго порядка от мнимого аргумента, значение функции $K_0(x)$ приводится в работе [11].

При оценке разведанных запасов подземных вод в неоднородно слоистых пластах на практике часто применяются расчеты, отвечающие фильтрационной схеме изолированного пласта. Это объясняется трудностями обоснования расчетных схем с перетеканием по данным разведки и недостаточной разработанностью методики оценки эксплуатационных запасов подземных вод применительно к этим схемам.

По результатам разведки очень сложно и трудно однозначно установить, будет ли при данных выявленных гидрогеологических условиях и геологическом строении происходить при эксплуатации перетекание подземных вод через слабопроницаемые

слои или иметь место упругое отжатие воды из этих пластов и т. д.

Эксплуатационные запасы для слоистого строения водоносного комплекса, подсчитанные по формулам, выведенным для изолированного пласта (основное расчетное уравнение Тейса), несколько занижены. В настоящее время установлено, что через сравнительно короткое время в двухслойной толще (верхний слой которой менее проницаем, чем нижний, и содержит безнапорные воды) снижение уровня воды в скважине при работе происходит так же, как в изолированном напорном пласте с коэффициентом пьезопроводности

$$a = km/(\mu + \mu^*), \tag{16.55}$$

где km — водопроводимость нижнего напорного горизонта; μ — гравитационная водоотдача верхнего безнапорного водоносного горизонта; $\mu_н^{\otimes}$ — упругая водоотдача напорного пласта.

Поскольку $\mu_B \geqslant \mu_н^{\otimes}$, зависимость (16.55) можно записать в следующем виде:

$$a = km/\mu. \tag{16.56}$$

Необходимое время, когда устанавливается отмеченная выше закономерность в движении подземных вод в двухслойной среде, по Ф. М. Бочеверу, выражается следующим образом:

$$t \geqslant (3 \div 5)\frac{\mu h_{ср}}{k_в}, \tag{16.57}$$

где $h_{ср}$ и $k_в$ — средняя мощность и коэффициент фильтрации верхнего безнапорного горизонта.

При длительной работе водозабора движение подземных вод к скважинам происходит так же, как в изолированном напорном пласте и в трехслойной среде (например, два водоносных напорных горизонта, разделенных слабопроницаемым слоем) с перетеканием при изменяющемся уровне воды в питающем слое. В этом случае коэффициент водопроводимости и пьезопроводности в формулах для изолированного пласта можно определить следующим образом:

$$km = (km)_1 + (km)_2; \tag{16.58}$$

$$a = \frac{(km)_1 + (km)_2}{\mu_1^* + \mu_2^*} \cdot e^{2\alpha \ln \frac{1{,}12B}{r_i}}. \tag{16.59}$$

$$\alpha = \frac{(km)_1}{(km)_2}, \tag{16.60}$$

где $(km)_1$ и $(km)_2$ — водопроводимости взаимодействующих водоносных горизонтов; $\mu_1^{\otimes}$ и $\mu_2^{\otimes}$ — коэффициенты водоотдачи этих горизонтов.

Непосредственные расчеты по оценке запасов подземных вод при этом можно произвести по формулам (16.16), (16.17) и

(16.18). В условиях трехслойного разреза расчет по формулам для изолированного пласта возможен при условии когда $r/B<0{,}4$; $t>10r^2/a$.

Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод на месторождениях речных долин. Месторождения подземных вод речных долин имеют в нашей стране широкое распространение, а их эксплуатационные запасы довольно интенсивно используются в народном хозяйстве. Наиболее существенными природными факторами, определяющими условия формирования подземных вод, методику их разведки и оценку запасов, являются:

— геолого-геоморфологические условия, характеризующие историю образования речной долины в целом и в частности поисковой площади; формирование строения и распространение в долине рыхлых аллювиальных отложений, характер взаимоотношения их с вмещающими коренными породами;

— геолого-гидрогеологические условия, характеризующие мощность, литологический состав, фильтрационные свойства, изменения этих свойств по площади и в вертикальном разрезе водовмещающих рыхлых аллювиальных пород и подстилающих их коренных пород;

— гидролого-гидрогеологические условия, определяющие условия и степень гидравлической связи подземных и поверхностных вод (в том числе характер кольматации русловых отложений), а также взаимосвязь между водоносными горизонтами при двух или трехслойном строении речной долины;

— гидрологические условия, характеризующие режим поверхностного стока в годовом и многолетнем разрезе, качество поверхностных вод, условия прохождения паводкового расхода реки (продолжительность паводка, условия затопления террасовых поверхностей, эрозионная деятельность и др.).

Особенностями разведки месторождений подземных вод речных долин являются:

— проведение в комплексе поисково-съемочных работ геоморфологических исследований с целью изучения условий формирования рыхлых аллювиальных отложений, с которыми чаще всего связано распространение продуктивного водоносного горизонта;

— методические приемы проведения на месторождении наземных геофизических исследований (главным образом методы электроразведки), преимущественно по поисковым поперечникам речной долины, а также по увязочным продольным профилям с целью изучения условий распространения, мощности и литологического состава рыхлых водовмещающих аллювиальных пород и погребенного рельефа коренных пород;

— установление характера взаимосвязи подземных и поверхностных вод (режим подпертой или свободной фильтрации потока); определение с помощью кустовых откачек в сочетании с данными режимных наблюдений, гидравлического сопротивле-

ния в прирусловой зоне реки — с помощью коэффициентов сопротивления заиленного слоя (A_0) и перетекания (A), вертикального коэффициента фильтрации (K_0) и мощности (m_0) заиленного слоя в реке; либо в условиях установившейся фильтрации — величины суммарного фильтрационного сопротивления в прирусловой части реки (параметр — ΔL) (см. гл. 12);

— проведение на месторождении в зависимости от гидрогеологических условий, режимных балансово-гидрометрических, гидрологических исследований с целью оценки баланса подземных и поверхностных вод, изучение режима поверхностного стока в годовом и многолетнем разрезе, а также режима взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод на месторождениях речных долин имеет некоторые особенности, которые целесообразно рассмотреть подробно.

Главная отличительная черта этих месторождений состоит в высокой степени обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод за счет привлечения поверхностных вод, путем эксплуатации, в подавляющем большинстве случаев, так называемых водозаборов инфильтрационного типа. В связи с этим можно отметить следующие особенности оценки разведанных запасов:

— оценка эксплуатационных запасов чаще всего производится путем определения (как и для других типов месторождений) возможного дебита водозаборных скважин при известном значении допустимого понижения уровня ($S_{доп}$);

— расчет обеспеченности разведанных запасов за счет основного источника их формирования производится путем определения величины речного стока (среднегодового, среднемеженного, минимальных среднемесячных расходов реки), 95-, 90-, 85- и 50 %-ной обеспеченностей, а также соответствующего этим характеристикам режима уровня воды в реке и в водоносном горизонте;

— расчет гидравлического сопротивления и пропускной способности русловых отложений реки, а также оценка возможного отрыва уровня подземных вод от дна реки или подошвы слабопроницаемого слоя в период будущей эксплуатации водозабора;

— расчет величины сработки емкостных естественных запасов подземных вод в период отсутствия стока в реке и расчет восполнения сработанных запасов в период паводковых расходов речных долин, в которых проектный водоотбор не обеспечивается постоянным поверхностным стоком;

— расчет возможного изменения расхода поверхностных вод реки при будущей эксплуатации водозабора.

Перечисленные выше задачи могут быть решены преимущественно гидродинамическим методом; при сравнительно простых геологических и гидрогеологических условиях — методом аналитических расчетов, а при сложных гидрогеологических ус-

ловиях и фильтрационной неоднородности — методом математического моделирования.

Некоторые особенности имеются и при преобразовании гидрогеологических условий месторождения подземных вод речных долин в расчетные типовые схемы.

Для речных долин, имеющих постоянно действующие поверхностные потоки, одной из расчетных границ может быть принято современное русло реки как граница с постоянным напором при условии, что между поверхностными и подземными водами имеется постоянная гидравлическая связь, а также при условии сохранения в период будущей эксплуатации водозабора подпертого режима фильтрации потока.

Вторая расчетная граница обычно принимается в прибортовой части речной долины. Чаще всего эту границу, вследствие ухудшения фильтрационных свойств пород, можно принять как непроницаемую ($q = 0$). При несущественном различии фильтрационных свойств водовмещающих пород в сторону водораздела пласт может рассматриваться как неограниченный в плане.

Расчетная схема полуограниченного пласта с контуром постоянного напора может быть использована и при преобразовании гидрогеологических условий месторождений широких речных долин, когда ее коренной борт удален от водозабора на расстояние, примерно более чем в два раза превышающее расстояние водозабора от реки. На месторождениях подземных вод в узких речных долинах для аналитических расчетов может быть использована типовая расчетная схема «пласт-полоса» с разнородными границами — постоянный напор на современном русле реки и условия нулевого расхода в прибортовой части долины.

Если разведочный участок расположен на площади крутой излучины, или на острове между рекой и каналом его гидрогеологические условия могут быть преобразованы в расчетную схему «пласт-полоса» с двумя границами постоянного напора.

Наиболее специфической задачей, возникающей при разведке месторождений подземных вод в речных долинах, является установление характера взаимосвязи подземных и поверхностных вод, т. е. параметра A_0, который характеризует фильтрационное сопротивление слабопроницаемого слоя под руслом, обусловленное кольматацией русловых отложений, несовершенством вреза русла реки в водоносный горизонт и др.

Коэффициент сопротивления заиленного слоя A_0 и коэффициент перетекания A В. М. Григорьев предложил определять по следующим зависимостям:

$$A_0 = m_0/k_0; \tag{16.61}$$

$$A = 1/(A_0 km), \tag{16.62}$$

где m_0 и k_0 — соответственно коэффициент фильтрации и мощность заиленного слоя в русле реки; km — водопроводимость продуктивного горизонта.

При оценке разведанных запасов подземных вод по уравнению Форхгеймера Ф. М. Бочевер предложил значение дополнительного фильтрационного сопротивления русловых отложений реки учитывать следующим образом:

$$S_{\text{рас}} = \frac{Q}{2\pi km}(R_1 + R_2), \tag{16.63}$$

где R_1 — гидравлическое сопротивление в условиях совершенной связи подземных и поверхностных вод; R_2 — дополнительное фильтрационное сопротивление, обусловленное несовершенством вреза русла реки и сопротивлением подрусловой толщи.

В практике оценки эксплуатационных запасов подземных вод в условиях установившейся фильтрации потока на водозаборном участке учет суммарного фильтрационного сопротивления в прирусловой зоне производится по методу В. М. Шестакова путем определения параметра ΔL по уравнению (12.29).

При выполнении условий

$$b > \frac{1{,}5 \div 2}{\sqrt{A_0}} \tag{16.64}$$

значение $\operatorname{cth} \frac{b}{\sqrt{kmA_0}}$ можно принять равным единице.

Величина ΔL вводится в формулу для оценки разведанных запасов заменой действительного расстояния до реки l_0 от водозаборных скважин расчетным параметром $L_{\text{р}}$

$$L_{\text{р}} = l_0 + \Delta L. \tag{16.65}$$

Обычно определения значений параметров A_0 и ΔL производятся по данным кустовых откачек или наблюдений за режимом подземных вод.

Все расчетные зависимости для оценки разведанных запасов, в которых используется параметр ΔL, справедливы только при условии, что на месторождении отмечается подпертый режим фильтрации, когда в процессе будущей эксплуатации водозабора не произойдет «отрыв» уровня грунтовых вод от реки.

При разведке месторождений подземных вод речных долин важно также оценить пропускную способность русловых отложений реки с целью проверки обеспеченности проектной производительности водозабора. Этот параметр определяется по зависимости

$$q = \frac{h_{\text{р}} + m_0}{A_0} 2b, \tag{16.66}$$

где q — единичный расход за счет инфильтрации поверхностных вод через русловые отложения реки.

Параметры поперечного сечения русла реки $h_{\text{р}}$ (средняя величина столба воды в реке) и $2b$ (ширина русла) должны

в данном случае приниматься приведенными к уровню реки, отвечающему минимальному 30-ти суточному значению года 95 %-ной обеспеченности.

Некоторые особенности имеет оценка разведанных запасов и на месторождении подземных вод речных долин, на площади которых поверхностные воды действуют не постоянно, а только периодически. В таких условиях оценка эксплуатационных запасов подземных вод производится в два этапа.

На первом этапе производится оценка запасов на меженный период, когда отсутствует питание подземных вод. В этот период, который устанавливается по данным гидрологических наблюдений, по существу происходит сработка емкостных запасов продуктивного водоносного горизонта. На втором этапе производится расчет восполнения ранее сработанных емкостных запасов за счет инфильтрации поверхностных вод. Объем восполнения емкостных запасов во многих случаях может быть определен на основании натурных режимных наблюдений.

Расчет инфильтрации поверхностных вод на площади затопляемой пойменной террасы, по Ф. М. Бочеверу, сводится к следующему:

— при однослойном строении поймы определяется время t_1, за которое произойдет возобновление ранее сработанных запасов по формуле, предложенной П. Я. Полубариновой-Кочиной:

$$t = \frac{\mu_н}{k}\left[Z_0 - h\ln\left(1 + \frac{Z_0}{h_n}\right)\right], \qquad (16.67)$$

где $\mu_н$ и k — коэффициент недостатка насыщения и коэффициент фильтрации пойменных отложений; h_n — суммарная высота слоя воды на поверхности поймы; Z_0 — глубины инфильтрации поверхностных вод (от уровня реки до глубины залегания динамического уровня подземных вод).

Общий объем воды, поступившей за это время, составит

$$V_{общ} = \mu_п Z_0 F_п, \qquad (16.68)$$

где $F_п$ — площадь затопленной пойменной террасы.

С учетом объема воды, отбираемого водозабором за время возобновления запасов, собственно объем восполняемых запасов подземных вод $V_{воз}$ будет равен

$$V_{воз} = V_{общ} - Q_{сум}t, \qquad (16.69)$$

где $Q_{сум}$ — суммарный дебит водозабора.

Наконец, еще одна задача должна быть решена — оценка возможного уменьшения величины поверхностного стока реки при постоянной эксплуатации инфильтрационных, береговых водозаборов. В простых гидрогеологических условиях, когда на месторождении отмечается совершенная связь подземных и

поверхностных вод, такая оценка может быть выполнена по формуле

$$\Delta Q_{ст} = Q_{сум} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{l_0}{2\sqrt{a_y t}}\right), \qquad (16.70)$$

где $\Delta Q_{ст}$ — величина сокращения поверхностного стока (изменения расхода реки на момент времени t после начала работы водозабора; $Q_{сум}$ — суммарный дебит водозабора; l_0 — расстояние от водозабора до реки; erfc — специальная функция, значения которой приведены ниже:

$\frac{l_0}{2\sqrt{at}}$	0,0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
$\operatorname{erfc}\left(\frac{l_0}{2\sqrt{at}}\right)$	1,0	0,90	0,89	0,83	0,78	0,72	0,67

Продолжение

$\frac{l_0}{2\sqrt{at}}$	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
$\operatorname{erfc}\left(\frac{l_0}{2\sqrt{at}}\right)$	0,62	0,57	0,52	0,48	0,44	0,40

Продолжение

$\frac{l_0}{2\sqrt{at}}$	0,70	0,80	0,90	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\operatorname{erfc}\left(\frac{l_0}{2\sqrt{at}}\right)$	0,32	0,26	0,20	0,16	0,09	0,05	0,03	0,01	0,005

Величина суммарных потерь речного стока $\Delta V_{ст}$ за время от 0 до t может быть рассчитана по формуле:

$$V_{ст} = 4Q_{сум}t \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{l_0}{2\sqrt{a_y t}}\right). \qquad (16.71)$$

Формулы (16.70) и (16.71) справедливы для условий достаточно однородных в плане пластов; в них не учитывается возможное сокращение расхода реки за счет периодического восполнения сработанных емкостных запасов подземных вод.

Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод на месторождениях конусов выноса. Как было отмечено в гл. 5, месторождения подземных вод, приуроченные к площади конусов выноса имеют некоторые гидрогеологические особенности. Геолого-гидрогеологические особенности конусов выноса четко определяют горизонтальную гидрогеологическую зональность. В верхней части конуса, сложенной нередко мощной толщей с высокой водопроводимостью галечниковых пород, формируется безнапорный режим фильтрации; в центральной части, в толще переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых по-

род — зона напорного режима, где на границе смены галечниковых и песчано-глинистых образований происходит частичная разгрузка подземных вод в виде многочисленных родников. В периферийной части конуса выноса, сложенной песчано-глинистыми породами, наблюдается разгрузка подземных вод преимущественно путем испарения.

Эти гидрогеологические особенности месторождений предопределяют методику разведки и выбор наиболее перспективных участков.

В традиционном комплексе разведочных работ целесообразно:

а) предусматривать проведение детальных режимных балансово-гидрометрических исследований, результаты которых могут позволить оценить не только условия формирования, но и количественную характеристику естественных ресурсов подземных вод;

б) изучить в процессе бурения скважин и проведения опытных кустовых откачек фильтрационные свойства многопластовой водоносной системы в вертикальном разрезе с целью выбора наиболее продуктивной ее части для последующего размещения собственно водозаборных соружений;

в) при сложной системе размещения водозаборных сооружений — предусматривать проведение предпроектного разведочного моделирования с целью обоснования комплекса гидрогеологических работ. Под разведку целесообразно выбирать участок в зоне распространения безнапорных или слабонапорных подземных вод, вблизи контакта галечниковых образований с переслаивающейся толщей песчано-галечниковых пород и слабопроницаемых суглинков. На этих участках водоносные галечники характеризуются высокой проводимостью и неглубоким залеганием уровня подземных вод.

В практике эксплуатации подземных вод месторождений конусов выноса известны примеры размещения водозаборных сооружений в зоне распространения многопластовой системы и формирования напорного режима как для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения, так и для целей орошения. В этом отношении многопластовую толщу водовмещающих пород и разделяющих их слабопроницаемых пород следует рассматривать как единую пространственную водоносную гидравлически связанную систему; величина напора подземных вод в этой толще возрастает по мере увеличения глубины залегания водоносных горизонтов, что предопределяет условия восходящего движения подземных вод через слабопроницаемые слои к поверхности и формирования естественной их разгрузки (в виде источников и испарения).

Балансовая структура эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках месторождения конусов выноса может формироваться за счет следующих источников: а) естественных ресурсов (включая родниковую сеть и расход

потока на испарения); б) естественных запасов; в) искусственных ресурсов (формирующихся под влиянием орошения земель).

Естественные ресурсы подземных вод, формирующихся на месторождении, можно оценить балансовым методом по результатам балансово-гидрометрических исследований. Суммарный родниковый сток в период минимума, а также величина суммарного испарения в этом отношении могут характеризовать нижний предел естественных ресурсов подземных вод месторождения в целом.

Что же касается эксплуатационных запасов, то во всех случаях их количественную оценку целесообразно выполнять гидродинамическими методами расчетов: аналитическим и методом математического моделирования.

Сложившаяся практика использования разведанных запасов подземных вод на месторождении конусов выноса показывает, что их отбор из недр земли может производиться с помощью: а) системы групповых сосредоточенных водозаборов (главным образом для целей централизованного водоснабжения); б) площадной системы расположения водозаборных скважин (главным образом для целей орошения земель); в) комбинированной системы сочетания групповых и площадных водозаборов (при одновременном решении вопросов централизованного водоснабжения и орошения).

При каптаже подземных вод системой групповых водозаборов, когда их суммарный дебит существенно меньше общих потенциальных возможностей месторождения, оценку эксплуатационных запасов целесообразно выполнять методом аналитических расчетов; если проектируемый дебит водозаборных сооружений соизмерим с общими ресурсами и запасами подземных вод, такую оценку лучше проводить методом математического моделирования. Оценке эксплуатационных запасов всегда должно предшествовать составление расчетной схемы участка.

При фильтрационной схематизации гидрогеологических условий разведочных участков необходимо учитывать верхнюю границу потока (примыкающую в плане к коренным породам) и нижнюю границу — зону естественной разгрузки подземных вод. Верхнюю границу, значительно удаленную от водозаборного участка, можно рассматривать как пласт неограниченный в плане; нижняя граница оказывает существенное влияние на режим работы водозабора, и ее необходимо строго учитывать. Расчетная схема водоносного горизонта таким образом может быть принята в виде полуограниченного пласта. При этом может быть две основные разновидности расчетной схемы полуограниченного пласта: а) полуограниченный пласт с условием постоянного напора на нижней границе, если проектный дебит водозабора меньше величины естественной разгрузки подземных вод, и при этом в процессе эксплуатации в зоне разгрузки будут сохранены источники; б) полуограниченный пласт с не-

проницаемой границей, если в естественных условиях зона разгрузки выражена слабо и источники подземных вод отсутствуют. Использование второй схемы даст запас прочности в расчетах, так как при оценке не учитывается разгрузка подземных вод испарением.

Оценку разведанных запасов методом аналитических расчетов, в зависимости от заявленной потребности в воде и конкретных гидрогеологических условий, можно выполнить по двум вариантам: 1) когда суммарный отбор подземных вод на участке группового водозабора будет меньше суммарного расхода родников и испарения в зоне естественной разгрузки; 2) когда эксплуатационный отбор подземных вод, намечаемый на водозаборном участке, будет превышать суммарный расход родников. И в том, и в другом варианте групповой водозабор целесообразно разместить в виде поперечного линейного ряда взаимодействующих скважин в области напорного режима перед зоной родникового стока.

Для оценки разведанных запасов по первому варианту можно допустить, что групповой водозабор будет работать в условиях стационарного режима фильтрационного потока, зону родникового стока при этом можно рассматривать как зону постоянного напора. При этих условиях аналитические расчеты оценки понижения уровня воды в скважине «бесконечного» ряда можно выполнить по уравнению Маскета-Лейбензона

$$S_{1_{\text{рас}}} = \frac{Q_{\text{скв}}}{2\pi km}\left(\ln\frac{1}{2\pi r_0} + \frac{2\pi l}{\lambda}\right), \qquad (16.72)$$

где $Q_{\text{скв}}$ — дебит скважины, в которой определяется понижение уровня; km — проводимость продуктивного пласта; λ — расстояние между скважинами ряда; l — расстояние от линейного ряда скважин до зоны родникового стока.

Допустимое понижение уровня $S_{\text{доп}}$ при этих расчетах определяется абсолютной отметкой выхода родников на поверхность.

При оценке эксплуатационных запасов подземных вод по второму варианту водозаборные скважины будут работать в условиях неустановившейся фильтрации, частичного осушения пласта; при этом родники следует рассматривать как ряд нагнетательных скважин. В этих условиях дополнительное понижение уровня воды в скважине линейного ряда $S_{2_{\text{рас}}}$ можно определить по следующей зависимости:

$$S_{2_{\text{рас}}} = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q_{\text{скв}}}{\pi k}\left(\ln\frac{\lambda}{2\pi r_0} + \frac{3{,}55\sqrt{at}}{\lambda} + \frac{2Q_{\text{род}}\sqrt{at}}{BR}R\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)\right)}, \qquad (16.73)$$

где H — мощность водоносного горизонта; $Q_{\text{скв}}$ — дебит скважины, в которой определяется уровень; k — коэффициент филь-

трации; r — радиус скважины; t — время; B — ширина полосы; a — коэффициент уровнепроводности; $Q_{\text{род}}$ — суммарный дебит родников в ширине полосы B; x — расстояние между линейным рядом скважин и контуром зоны разгрузки; $R\left[x/\left(2\sqrt{at}\right)\right]$ — функция, значения которой приведены ниже:

$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$R\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$	0,564	0,52	0,41	0,38	0,31	0,25	0,20	0,15

Продолженне

$\frac{x}{2\sqrt{at}}$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,3	1,5	2,0
$R\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$	0,12	0,09	0,07	0,05	0,02	0,01	0,00

Общее расчетное значение понижения уровня будет:

$$S_{\text{рас}} = S_{1_{\text{рас}}} + S_{2_{\text{рас}}}. \qquad (16.74)$$

Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод на месторождениях артезианских бассейнов. Месторождения подземных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа имеют некоторые особенности их разведки и оценки эксплуатационных запасов. В вертикальном разрезе на месторождениях, как правило, распространено несколько этажно расположенных водоносных горизонтов; напорные водоносные горизонты коренных пород в этом разрезе, хотя и разделяются слабопроницаемыми породами, однако в гидрогеологическом отношении представляют собой вместе с грунтовыми водами четвертичных отложений единую гидравлически связанную водоносную систему, в крупных речных долинах с глубоким эрозионным врезом отмечается гидравлическая связь подземных вод с поверхностными водами. Это положение является очень важным для постановки поисково-разведочных работ и оценки запасов и подтверждается опытом эксплуатации подземных вод на крупных водозаборах.

I. На площади артезианских бассейнов часто отмечаются две области питания — внешняя и внутренняя. Внешняя область четко отмечается по границе непосредственного выхода водоносных пород на дневную поверхность. Внутренние области питания располагаются главным образом на водораздельных частях крупных речных долин. Эта гидрогеологическая особенность также играет существенную роль в формировании эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках.

2. Значительная площадь распространения водоносных горизонтов (измеряемая десятками и сотнями тысяч квадратных километров) и их большая мощность (в ряде случаев до 100 м)

обусловливают формирование на месторождениях огромных естественных запасов подземных вод.

3. В центральной части бассейна практически отмечается слабое влияние метеорологических и гидрологических факторов на формирование естественного режима напорных вод, поэтому при оценке их эксплуатационных запасов величина естественных колебаний уровня напорных горизонтов не играет существенной роли.

4. По мере увеличения глубины залегания напорных водоносных горизонтов и удаления от внешней области питания (приуроченной к местам выхода водосодержащих пород непосредственно на поверхность) отмечается постепенное увеличение общей минерализации и химического состава подземных вод (вертикальная гидрохимическая зональность), верхняя гидрогеохимическая зона распространения пресных подземных вод достигает мощности до 500—600, а иногда и больше метров; она располагается в пределах зоны активного подземного стока.

5. Формирование эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках может иметь сложный характер; основными источниками их могут быть: упругие запасы продуктивного водоносного горизонта, естественные емкостные и упругие запасы смежно залегающих водоносных горизонтов, упругие запасы слабопроницаемых разделяющих слоев, естественные ресурсы подземных вод месторождения, привлекаемые ресурсы за счет инфильтрации поверхностных вод.

Приведенные выше основные гидрогеологические закономерности формирования подземных вод определяют особенности их разведки и оценки их эксплуатационных запасов.

6. В общем содержании традиционных гидрогеологических работ, выполняемых обычно в стадии разведки, наибольшую особенность определяют комплексные исследования, связанные с изучением условий взаимосвязи между этажно расположенными водоносными горизонтами, а также между подземными и поверхностными водами. Результаты таких исследований служат основой для преобразования природных гидрогеологических условий разведочного участка в ту или иную расчетную схему и для выбора соответствующей расчетной зависимости для оценки эксплуатационных запасов.

Методом постановки разведочного бурения и кустовых откачек с этажно расположенными на разведочном участке опытными и наблюдательными скважинами на различные водоносные горизонты и разделяющие слои в сочетании с режимными наблюдениями должны быть изучены соотношения пьезометрических уровней подземных вод различных водоносных горизонтов, фильтрационные свойства водовмещающих пород и разделяющих слоев, гидрогеологическая зональность, условия взаимосвязи с поверхностными водами и др.

7. Поскольку по объективным причинам не всегда удается выявить процессы перетекания при проведении кустовых отка-

чек (ввиду их кратковременности) очень важным методическим приемом является анализ данных опыта эксплуатации действующих в аналогичных гидрогеологических условиях водозаборов. В этом направлении целесообразно выполнить контрольные расчеты понижения уровня подземных вод в скважинах на различные периоды времени при известной производительности водозабора применительно к различным схемам расчета (изолированный пласт или условия перетекания) с последующим сопоставлением расчетных данных с фактическими.

8. Оценка разведанных запасов подземных вод чаще всего производится гидродинамическим методом. Как и в предыдущем примере, при простых гидрогеологических условиях (однослойный разрез, однородное строение водоносного пласта) оценка разведанных запасов может быть выполнена аналитическими расчетами, а в сложных условиях (несколько водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми породами, условия перетекания и др.) — методом математического моделирования. Этим методом также целесообразно оценивать запасы при наличии на разведочной площади нескольких взаимодействующих между собой групповых водозаборов (проектируемых по результатам разведки и действующих водозаборов).

9. Для оценки разведочных запасов гидродинамическим методом природные условия месторождения могут быть представлены в виде нескольких расчетных схем, основными из которых являются: а) схема неограниченного в плане пласта, когда внешние границы продуктивного горизонта на месторождении не могут оказывать влияния на режим работы водозабора; б) схема полуограниченного пласта в плане, когда разведочный участок месторождений может быть расположен вблизи водотоков (в долине рек, вблизи водохранилищ), которые могут служить источником питания продуктивного горизонта (при наличии тесной гидравлической связи между подземными и поверхностными водами); расчетную схему полуограниченного пласта можно рассматривать и в том случае, когда разведочный участок располагается вблизи водонепроницаемой либо слабоводопроницаемой границы (например, технических нарушений, границ по контуру выклинивания продуктивного горизонта и др.).

Что же касается учета граничных условий разведочного участка в вертикальном разрезе, то в этом случае могут быть рассмотрены также две основные расчетные схемы: а) расчетная схема изолированного продуктивного горизонта, отделенного от выше и ниже лежащих смежных водоносных горизонтов практически водонепроницаемыми породами разделяющих слоев: при этой схеме процессы перетекания проявляются не существенно, поэтому ими можно при расчетах пренебречь. В этих условиях эксплуатационные запасы водозабора будут формироваться за счет других запасов. Такие гидрогеологические ус-

ловия на месторождениях подземных вод артезианских бассейнов платформенного типа встречаются редко. Запасы, оцененные по расчетной схеме «изолированного пласта», как показывает опыт, чаще всего являются заниженными. Объясняется это тем, что процессы перетекания между водоносными горизонтами наиболее интенсивно проявляются при длительной эксплуатации водозабора и не могут быть учтены при разведке; б) расчетная схема с перетеканием, когда процессы фильтрации осуществляются через слабопротекаемые породы, залегающие в кровле и подошве продуктивного горизонта и оказывающие существенное влияние на формирование эксплуатационных запасов подземных вод; такие гидрогеологические условия наиболее часто встречаются при разведке месторождений подземных вод артезианских бассейнов платформенного типа.

Более подробно особенности разведки и оценки эксплуатационных запасов вод подземных месторождений артезианских бассейнов платформенного типа изложены на конкретных примерах в главах 22 и 23.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод при большой мощности продуктивного горизонта. Ранее было отмечено, что гидрогеологические особенности некоторых месторождений подземных вод состоят в том, что мощность продуктивного водоносного горизонта составляет более 100—150 м, достигая на некоторых объектах до 250 м. При таких гидрогеологических условиях, которые могут быть выявлены на месторождениях конусов выноса, речных долин и т. д., целесообразно создавать на разведочном участке водозабор ярусного типа (см. гл. 2). Водозабор ярусного типа должен состоять из группы близко расположенных одна к другой эксплуатационных скважин (с расстоянием в 3—5 м) несовершенного типа, оборудованных фильтрами на различных интервалах глубин мощного продуктивного горизонта. При этом фильтры каждой скважины следует устанавливать ниже забоя предыдущей выработки; ниже приемного фильтра первой скважины и во всех последующих скважинах стенки должны быть закреплены глухими обсадными трубами (выше их фильтров).

Выбор интервалов глубин заложения фильтров скважин ярусного водозабора целесообразно производить на основании специальных геофизических исследований, результатов опытных кустовых откачек, а также результатов профильного моделирования на машинах АВМ. Профильное моделирование может позволить в значительной степени уточнить общую конструкцию ярусного водозабора и оценить эффективность интенсивного отбора подземных вод.

В связи с этим на разведочном участке требуется проведение целенаправленных гидрогеологических работ — бурение структурной глубокой скважины, проведение зональных опытных откачек, а затем бурение ярусных разведочных скважин, проведение кустовых откачек с ярусным расположением наблю-

дательных выработок, геофизические методы исследования и, наконец, профильное моделирование.

Водозаборное сооружение ярусного типа имеет следующие преимущества по сравнению с каптажным сооружением линейного типа: 1) представляется возможность компактно расположить эксплуатационные скважины; 2) интенсифицировать отбор подземных вод со всего разреза продуктивного водоносного горизонта; дебит одного узла трехъярусного водозабора при мощности горизонта 150—180 м может достигать 200 л/с.

Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод по пронзводительности ярусного водозабора В. М. Бочевером были предложены приближенные аналитические расчеты. При расчетах величины понижений уровней в трех взаимодействующих в вертикальном разрезе несовершенных скважинах (при заданных их дебитах) допускаются следующие условия: 1) поскольку мощность продуктивного водоносного горизонта намного превышает фактическую величину понижения уровня во взаимодействующих скважинах, подземный поток грунтовых вод можно рассматривать как напорный; 2) все скважины ярусного водозабора должны быть оборудованы затопленными фильтрами.

В таких гидрогеологических условиях основная расчетная зависимость, с помощью которой можно определить величину пониженя уровня в любой точке депрессии с координатами r и t под влиянием откачки из скважины несовершенного типа, будет иметь следующий общий вид:

$$S_{rt} = \frac{Q}{4\pi k l}\left(\operatorname{arsh}\frac{t-c}{r} + \operatorname{arsh}\frac{c+l-t}{r} + \operatorname{arsh}\frac{t+c+l}{r} - \operatorname{arsh}\frac{c+t}{r}\right). \quad (16.75)$$

Координату t условно можно принять на верхнем конце фильтра, тогда $t = c$. С большим запасом в расчетах можно также принять $t = c + (l/2)$. Расчетные схемы трех взаимодействующих скважин несовершенного типа приведены на рис. 46. Пользуясь приведенной выше в общем виде зависимостью, можно выразить влияние каждой скважины в отдельности на остальные при работе ярусного водозабора.

Влияние скв. 1 (при ее работе) на скважины 2 и 3 (см. рнс. 46, *а*). Понижение на стенке самой скважины при заданном ее расходе Q_1 будет

$$S_1^1 = \frac{Q_1}{2\pi k l_1}\ln\frac{0{,}66 l_1}{r_0}. \quad (16.76)$$

Влияние на скв. 2 (величина срезки уровня на линии оси скважины)

$$S_2^1 = \frac{Q_1}{4\pi k l_1}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_2-c_1}{r_{1-2}} + \operatorname{arsh}\frac{c_1+l_1-c_2}{r_{1-2}} + \operatorname{arsh}\frac{c_2+c_1-l_1}{r_{1-2}} - \operatorname{arsh}\frac{c_1+c_2}{r_{1-2}}\right). \quad (16.77)$$

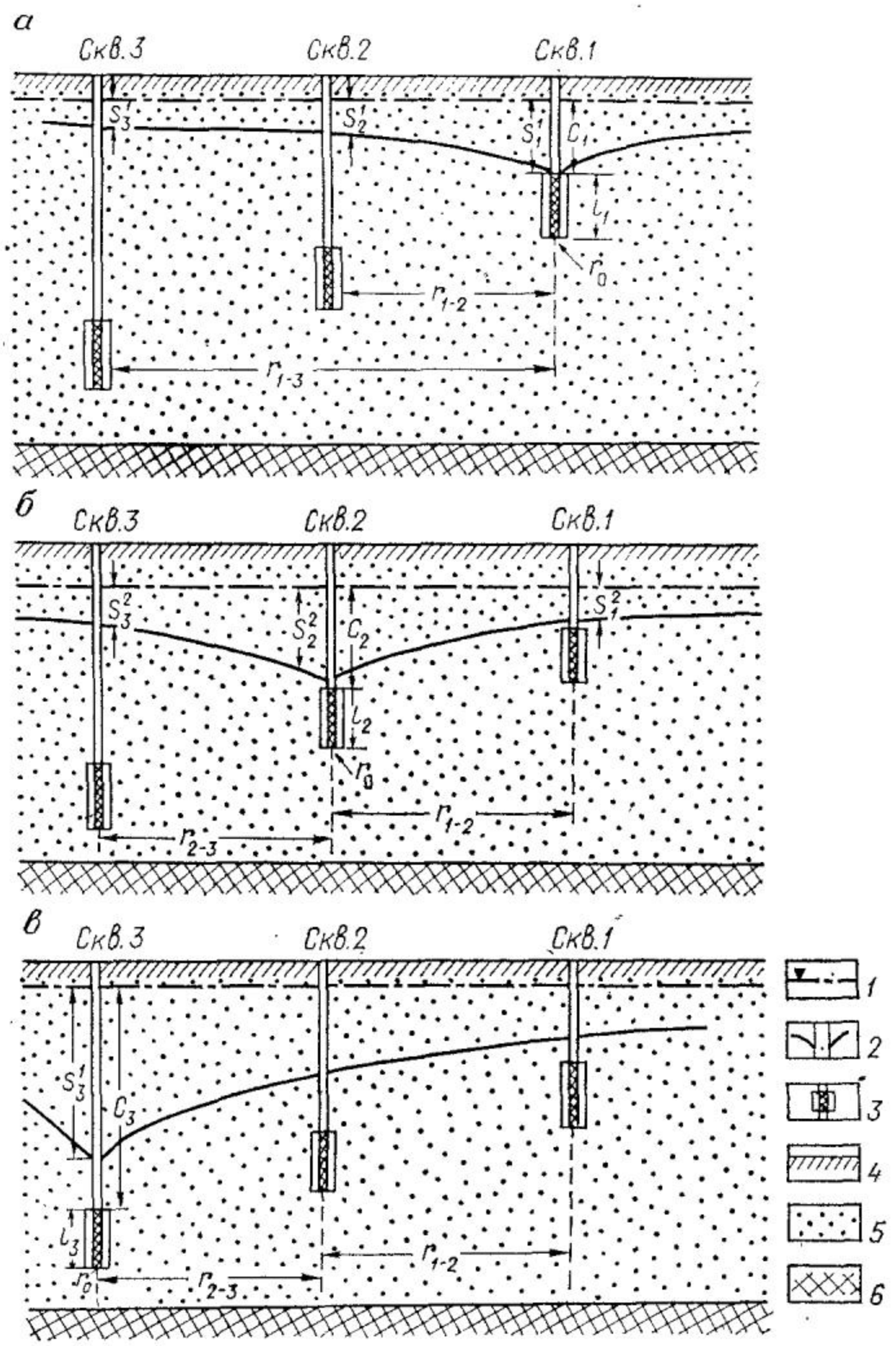


Рис. 46. Схемы к расчетам для оценки взаимодействия трех скважин ярусного водозабора.

а — влияние скв. 1 на скв. 2 и скв. 3; *б* — влияние скв. 2 на скв. 1 и скв. 3; *в* — влияние скв. 3 на скв. 1 и скв. 2.
1 — уровень грунтовых вод в естественном залегании; *2* — депрессионная воронка; *3* — фильтры несовершенных скважин; *4* — почвенный слой; *5* — водоносные породы; *6* — водонепроницаемые породы

Влияние на скв. 3 (величина срезки уровня по линии оси скважины)

$$S_3^1 = \frac{Q_1}{4\pi k l_1}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_3 - c_1}{r_{1-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_1 + l_1 - c_3}{r_{1-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_3 + c_1 + l_1}{r_{1-3}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arsh}\frac{c_1 + c_3}{r_{1-3}}\right). \qquad (16.78)$$

Влияние скв. 2 (при ее работе) на скважины 1 и 3 (см. рис. 46, *б*). Понижение на стенке самой скважины при заданном ее дебите Q_2

$$S_2 = \frac{Q_2}{2\pi k l_2} \ln \frac{0{,}66 l_2}{r_0}. \qquad (16.79)$$

Влияние на скв. 1 (величина срезки уровня на линии оси скважины)

$$S_1^2 = \frac{Q_2}{4\pi k l_2}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_1 - c_2}{r_{1-2}} + \operatorname{arsh}\frac{c_2 + l_2 - c_1}{r_{1-2}} + \operatorname{arsh}\frac{c_1 + c_2 + l_2}{r_{1-1}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arsh}\frac{c_2 + c_1}{r_{1-2}}\right). \qquad (16.80)$$

Влияние на скв. 3 (величина срезки уровня на линии оси скважин)

$$S_3^2 = \frac{Q_2}{4\pi k l_2}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_3 - c_2}{r_{2-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_2 + l_2 - c_3}{r_{1-2}} + \operatorname{arsh}\frac{c_3 + c_2 + l_2}{r_{2-3}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arsh}\frac{c_2 + c_3}{r_{2-3}}\right). \qquad (16.81)$$

Влияние скв. 3 (при ее работе) на скважины 1 и 2 (см. рис. 46, *в*). Понижение на стенке самой скважины при заданном ее дебите Q_3

$$S_3 = \frac{Q_3}{2\pi k l_2} \ln \frac{0{,}66 l_3}{r_0}. \qquad (16.82)$$

Влиянне на скв. 2 (величина срезки уровня на лннии оси скважины)

$$S_2^3 = \frac{Q_3}{4\pi k l_3}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_2 - c_3}{r_{2-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_3 + l_3 - c_2}{r_{2-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_2 + c_3 + l_3}{r_{2-3}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arsh}\frac{c_3 + c_2}{r_{2-3}}\right). \qquad (16.83)$$

Влияние на скв. 1 (величина срезки уровня на лннии оси скважин)

$$S_1^3 = \frac{Q_3}{4\pi k l_3}\left(\operatorname{arsh}\frac{c_2 - c_3}{r_{1-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_3 + l_3 - c_1}{r_{1-3}} + \operatorname{arsh}\frac{c_2 + c_3 + l_3}{r_{1-3}} - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arsh}\frac{c_3 + c_1}{r_{1-3}}\right). \qquad (16.84)$$

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения: Q_1, Q_2, Q_3 — заданные дебиты скважин ярусного водозабора; k — коэффициент фнльтрации (среднее значение для всех скважин); arsh — обратная гиперболическая функция, опре-

деляемая по графику значений функций или для приближенных расчетов может быть принята через логарифм — $\operatorname{arsh} z = \ln(z + \sqrt{z^2+1})$.

Суммарная величина понижения уровня в каждой скважине при их вертикальном взаимодействии на ярусном водозаборе будет составлять:

$$\text{В скв. 1:} \quad \sum S_1 = S_1 + S_1^2 + S_1^3; \tag{16.85}$$

$$\text{В скв. 2:} \quad \sum S_2 = S_2 + S_2^1 + S_2^3; \tag{16.86}$$

$$\text{В скв. 3:} \quad \sum S_3 = S_3 + S_3^1 + S_3^2. \tag{16.87}$$

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общие замечания и этапы исследований. Выше отмечалось, что не всегда удается произвести оценку эксплуатационных запасов подземных вод аналитическими расчетами, особенно если это необходимо выполнить для месторождений, имеющих сложные гидрогеологические условия. В связи с этим в практике оценка эксплуатационных запасов для таких месторождений выполняется методом математического моделирования на аналоговых (АВМ) и цифровых машинах (ЭВМ).

В общем комплексе гидрогеологических исследований методы математического моделирования имеют очень большое значение. Л. Лукнер и В. М. Шестаков [18] в этом отношении справедливо отмечают, что физико-математическое моделирование на современных машинах следует рассматривать «...как один из важнейших научных методов познания...» сложных гидрогеологических процессов.

Теоретические основы и методы математического моделирования для прогнозной оценки гидрогеологических процессов, в том числе и для прогнозной оценки ресурсов подземных вод, рассматриваются в курсе «Динамика подземных вод». Учитывая это обстоятельство, целесообразно в данном разделе рассмотреть особенности применения методов математического моделирования для оценки разведанных запасов.

Методы математического моделирования для решения гидрогеологических задач могут быть выполнены: а) на аналоговых машинах, основанных на электрогидродинамической аналогии; модель в этом случае может быть создана из сплошных сред или дискретных токопроводящих элементов; б) на электронно-цифровых машинах с помощью численного моделирования с использованием, в том числе, гибридных систем (типа Сатурн-2), представляющих собой автоматизированные сеточные модели, управляемые с помощью ЭЦВМ.

Преимущество аналогового моделирования гидрогеологических процессов, как справедливо отмечается в публикациях, состоит в том, что в процессе исследований осуществляется непосредственный контакт дополнителя с машиной на любом

этапе моделирования. Наряду с этим необходимо учесть, что моделирование на АВМ — весьма трудоемкий процесс. Численное моделирование гидрогеологических задач на АЦВМ, по сравнению с АВМ, имеет существенное преимущество, и прежде всего, в том, что весь процесс моделирования полностью автоматизирован — позволяет оперативно решать различные варианты задач, а также нестационарные задачи со сложными граничными условиями, автоматизировать выдачу результатов решения задач, строить различные графики и др.

В настоящее время внедрение численного моделирования сдерживается отсутствием необходимых комплексных универсальных программ. В будущем применение ЭЦВМ в практике разведочной гидрогеологии, как наиболее прогрессивного направления может получить широкое применение.

В настоящее время в практике разведочной гидрогеологии метод математического моделирования применяется в двух основных направлениях: а) с целью обоснования рациональных способов разведки месторождений так называемое поисково-разведочное моделирование; б) с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

Первое направление исследований проводится обычно при изучении месторождений подземных вод, имеющих очень сложные гидрогеологические условия. Поисково-разведочное моделирование по своему содержанию можно рассматривать как наиболее эффективный способ проектирования большого комплекса гидрогеологических работ по разведке объекта; оно позволяет обосновать по площади месторождения наиболее рациональное размещение объемов буровых и опытно-фильтрационных работ, основные методические положения в их проведении, а также предварительно оценить прогнозные запасы подземных вод. Поисково-разведочное моделирование применяется на практике как по площади конкретных месторождений подземных вод, так и в региональном плане по площади, например, артезианского бассейна. Наиболее существенным является исследование на модели, позволяющее уточнить граничные условия фильтрационного потока в плане и разрезе, гидрогеологические параметры продуктивного пласта, а затем оценить эксплуатационные запасы подземных вод.

Исследования гидрогеологических процессов методом математического моделирования проводятся в несколько этапов.

Первый этап предусматривает целенаправленное обобщение и анализ всей имеющейся по району месторождения подземных вод исходной геологической, гидрологической и гидрогеологической информации с целью составления ряда специализированных карт, отражающих общие условия и особенности формирования подземных вод. Перечень и содержание обобщающих гидрогеологических материалов приводится ниже.

Второй этап — наиболее важный, предусматривает составление расчетной схемы месторождения путем преобразова-

ния природных гидрогеологических условий объекта. При этом учитываются следующие принципы схематизации природных условий: принцип упрощения структуры фильтрационного потока путем сведения реальной пространственной фильтрации к более простой плановой или линейной; принцип осреднения значений гидрогеологических параметров продуктивного горизонта и учет закономерностей их изменения по площади; принцип упрощения строения водоносных толщ месторождения по вертикали — сведение многослойной структуры по гидрогеологическим признакам в одно- или двухслойную систему; принцип схематизации граничных условий в плане — замена криволинейных функций ступенчатыми графиками и др.

Третий этап — построение на базе обобщенных гидрогеологических материалов и расчетной схемы эквивалентной электрической модели на АВМ.

Четвертый этап — предварительные исследования непосредственно на модели путем решения так называемых обратных задач с целью уточнения гидрогеологических параметров пласта, а также граничных условий изучаемого объекта.

Пятый этап — решение прямых задач — исследования на модели вариантных задач с целью прогнозной оценки эксплуатационных запасов подземных вод на разведочном участке или бассейне в целом с последующей их категоризацией.

Перечень и содержание гидрогеологических материалов, необходимых для моделирования. Метод математического моделирования для решения задач разведочной гидрогеологии предъявляет соответствующие требования к содержанию и необходимому объему гидрогеологической информации, которая, как правило, подготавливается в систематизированном и обобщенном виде. С другой стороны, этот метод своими требованиями оказывает свое влияние на содержание полевых и камеральных гидрогеологических работ. Основные требования к исходной гидрогеологической информации по существу определяются методикой и технологией моделирования на АВМ и ЭЦВМ. Главные задачи сбора, обобщения, систематизации и анализа исходной гидрогеологической информации состоят в том, чтобы четко охарактеризовать для объекта условия формирования подземных вод, начальные и граничные условия фильтрационного потока в плане и разрезе, фильтрационные свойства водовмещающих и разделяющих пород, формирование режима подземных и поверхностных вод, обосновать составление расчетной схемы, а также построение математической модели.

Составление карты изученности и фактического материала объекта исследований путем систематизации геологической, гидрологической и гидрогеологической исходной информации. На карте изученности должны найти отражение основные факторы, определяющие условия формирования подземных вод: геолого-структурные элементы (в том числе тектонические нарушения);

гидрологическая сеть района месторождения (реки, озера, водохранилища, ирригационные и транспортные каналы); гидрогеологические факторы, отражающие условия залегания и распространения подземных вод: буровые скважины, шахтные колодцы, родники, действующие водозаборные сооружения и осушительные устройства, горные выработки и т. д.

Специализированные гидрогеологические карты включают: а) карты гидроизогипс или гидроизопьез, отражающие структуру фильтрационного потока; б) карты гидрогеологических параметров водовмещающих пород (карты микрорайонирования по значениям проводимости пласта, пьезопроводности или емкостных свойств водовмещающих пород); в) карты, отражающие условия питания и естественной разгрузки подземных вод (с выделением участков инфильтрационного питания за счет атмосферных осадков, участков с различными условиями связи подземных и поверхностных вод, выхода родников и др.); г) карты глубин залегания подземных вод, а также гидрогеохимические карты, отражающие условия формирования химического состава подземных вод; д) карты, отражающие расчетную схему объекта исследований.

Все перечисленные, а также дополнительные карты, необходимость составления которых может возникнуть в связи с особенностями того или иного типа месторождения подземных вод, рекомендуется составлять в одном масштабе. Выбор масштаба во многом зависит от площади изучаемого объекта и степени его сложности. Поэтому масштабы карт могут изменяться от 1 : 10 000 до 1 : 100 000.

Для моделирования большое значение имеет также систематизация исходной гидрологической и гидрогеологической информации в форме различных обобщающих графиков и сводных таблиц. В этом отношении наиболее существенными являются графики, характеризующие режим (уровня, химического состава, температуры) подземных вод в естественных и нарушенных условиях, а также графики дебитов скважин. Известно в этом отношении, что режим уровня достаточно четко характеризует условия питания и стока подземных вод, взаимосвязь между водоносными горизонтами, а также между подземными и поверхностными водами. Большое значение также имеют данные о структуре водного баланса района месторождения.

Как следует из краткого перечня необходимой информации в обобщенном виде, ее подготовка для целей математического моделирования требует проведения специальной камеральной обработки материалов. Камеральная обработка имеющихся материалов в рамках требований исследований на математической модели по существу своего содержания является составной частью общей схемы подготовительного этапа моделирования. Методика систематизации и обобщения гидрогеологической информации применительно к требованиям моделирования изложена в работах [6, 8, 17, 24, 26].

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ МЕТОД

Сущность гидравлического метода оценки разведанных запасов подземных вод состоит в том, что расчетный дебит водозабора (или прогнозное понижение уровня в водозаборных скважинах) оценивается по эмпирическим данным, полученным непосредственно в процессе либо проведения детальных опытно-фильтрационных работ, либо опыта эксплуатации; при этих условиях полученные гидрогеологические данные косвенно учитывают влияние различных факторов, определяющих режим работы водозабора.

Целесообразно применять гидравлический метод оценки запасов при разведке месторождений подземных вод, отнесенных к третьей и частично второй группам (см. табл. 7), имеющим, как правило, сложные природные условия: значительную фильтрационную неоднородность водовмещающих пород продуктивного горизонта, сложную конфигурацию граничных условий фильтрационного потока в плане, невыясненные источники формирования эксплуатационных запасов, сложные гидрогеохимические условия. К таким типам следует, например, отнести месторождения трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений, трещинно-карстовых вод и др.

Разведка таких месторождений должна проводиться с учетом требований гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов.

При оценке эксплуатационных запасов гидравлические методы можно использовать для решения трех основных задач:

1) для прогнозной оценки понижения динамического уровня подземных вод в скважине при заданном ее дебите по кривым зависимостей дебита от понижения в условиях установившегося режима фильтрационного потока;

2) для прогнозной оценки величины срезок уровня воды при расчетах взаимодействующих скважин (также в условиях установившегося режима потока);

3) для определения понижения уровня на конец расчетного периода в эксплуатационной скважине при постоянном дебите по установленному эмпирическим путем закону снижения уровня во времени при данном водоотборе (в условиях неустановившегося режима потока).

С учетом этих условий на разведочном участке должны проводиться соответствующие опытные работы.

В отличие от гидродинамических методов, при использовании которых расчетные зависимости обычно определяются по типовым схемам, а гидрогеологические параметры пласта оцениваются, исходя из схематизированных граничных условий водоносного пласта, в гидравлических методах как расчетные зависимости, так и их основные параметры определяются непосредственно по данным эксперимента (опытных откачек). Тем самым в процессе опыта обобщенно учитывается влияние

самых различных гидрогеологических факторов: неоднородность пласта, наличие различных границ, сопротивление в прискважинной зоне, нарушения линейного закона фильтрации и др. В связи с этим гидравлические методы целесообразно применять на месторождениях со сложными гидрогеологическими условиями, характеризующимися неоднородным строением фильтрационной среды и трудно устанавливаемыми источниками формирования эксплуатационных запасов. Так, в условиях установившейся фильтрации, гидравлические методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод нашли широкое применение при разведке месторождений в речных долинах, в которых водоносный горизонт приурочен к неравномерно трещиноватым или закарстованным породам. При неустановившейся фильтрации этот метод применяется для оценки эксплуатационных запасов подземных вод некрупных месторождений, приуроченных к зонам тектонических нарушений с неустановленными источниками формирования запасов. В этих случаях гидравлический метод заключается в установлении опытным путем зависимостей между темпом снижения уровня подземных вод и дебитом при заданном водоотборе.

Недостатком гидравлического метода является то, что этим методом нельзя определить обеспеченность восполнения эксплуатационных запасов подземных вод, так как эмпирические зависимости не включают значений элементов статей баланса потока. Поэтому этот метод целесообразно применять только в сочетании с другими методами — гидравлическим или балансовым. Исключение из этого правила составляет самостоятельное использование гидравлического метода для оценки запасов в условиях неустановившегося режима, например, установления эмпирического закона снижения уровней во времени в водозаборных скважинах. Особое значение при этом приобретает установление оптимальной продолжительности эксперимента (опытных откачек). Продолжительность должна быть выбрана таким образом, чтобы на графике зависимости $S=f(t)$ было отражено влияние всех выявленных границ водоносного горизонта. Однако и в этом случае нет уверенности в том, что в процессе опыта (при разведке месторождений) все природные факторы оказывали влияние на формирование фильтрационного потока.

При оценке эксплуатационных запасов с помощью решения первой из вышеперечисленных задач прогноз понижения динамического уровня воды в опытных скважинах при заданном значении дебита заключается в построении графиков зависимостей дебитов скважин от понижения уровней с их последующей допустимой экстраполяцией. Методика построения графика $Q=f(S)$ и метод экстраполяции достаточно подробно рассмотрены в курсах общей гидрогеологии и динамики подземных вод.

Вторая задача — определение срезок уровня при работе взаимодействующих скважин для оценки эксплуатационных за-

пасов решается путем увеличения или уменьшения значений срезок уровней подземных вод, полученных непосредственно в процессе опытных откачек во столько раз, во сколько проектные дебиты взаимодействующих скважин, вызывающих срезку, больше или меньше дебитов опытных скважин, полученных при откачках.

В условиях стационарного режима фильтрации потока расчетное понижение уровня воды во взаимодействующей скважине группового водозабора будет, таким образом, слагаться из понижения S_0 в самой скважине (работающей как одиночная скважина) и суммы понижений (дополнительных срезок), вызванных работой других взаимодействующих скважин.

При этих условиях расчетное понижение уровня целесообразно определять в скважине, расположенной в центре водозабора по следующей зависимости:

$$S_{\text{рас}} = S_0 + \Delta S_1 \frac{Q_1}{Q_1^{\text{оп}}} + \Delta S_2 \frac{Q_2}{Q_2^{\text{оп}}} + \ldots + \Delta S_n \frac{Q_n}{Q_n^{\text{оп}}}, \quad (16.88)$$

где S_0 — величина понижения в расчетной скважине, определенная по кривой дебита $Q=f(S)$ применительно к проектному ее дебиту; $\Delta S_1, \Delta S_2, \ldots, \Delta S_n$ — дополнительные понижения (срезка) уровня, полученные при опытных откачках; $Q_1^{\text{оп}}, Q_2^{\text{оп}} \ldots Q_n^{\text{оп}}$ — дебиты скважин при опытных откачках; $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ — проектные дебиты тех же скважин.

Как видно из изложенного, расчет взаимодействия скважин для оценки эксплуатационных запасов подземных вод гидравлическим методом допустим только для условий стационарного режима фильтрации.

Нередко приходится переоценивать эксплуатационные запасы на действующем водозаборе путем увеличения его производительности. В этих условиях при введении в схему водозабора дополнительных (проектных) скважин срезки уровня от их работы следует определять в зависимости от их расстояния до расчетной скважины. С этой целью по данным опытных откачек строятся графики $\Delta S_i=f(\lg r)$ при определенном дебите или сводный график $\Delta S_i/Q_i=f(\lg r)$ и по этим графикам определяется величина срезки на различном расстоянии от возмущающих скважин при заданном их дебите.

Третья задача, когда необходимо выполнить прогноз понижения уровня на конец расчетного периода в эксплуатационной скважине при постоянном ее дебите по установленному эмпирическим путем закону снижения уровня во времени при данном водоотборе, в разведке подземных вод встречается довольно редко. Ее решение основывается на обработке результатов опытно-фильтрационных работ. Эта обработка заключается в определении эмпирического закона изменения уровня воды в скважине во времени и оценке, несколько полно в достигнутой закономерности изменения отражены реальные природные

гидрогеологические условия. Для установления закона изменения уровня во времени целесообразно строить графики в координатах $S - \lg t$, $S - \sqrt{t}$, $S - t$, которые соответствуют условиям неограниченного (полуограниченного) полосообразного или замкнутого пласта, и в качестве расчетной выбирать зависимость наиболее близкую к прямолинейной.

Одной из модификаций гидравлического метода при неустановившемся движении является метод обобщенных параметров. При использовании этого метода реальные неоднородные пласты со сложной конфигурацией заменяются для прогнозной оценки запасов некоторым условным неограниченным однородным пластом с параметрами, определенными по конечным участкам графиков $S - \lg t$ (если последние прямолинейны). Этот метод позволяет прогнозировать понижение уровня и при величине расхода, превышающего полученный при опытно-эксплуатационной откачке, но при сохранении системы водоотбора.

БАЛАНСОВЫЙ МЕТОД

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод балансовым методом заключается в определении расхода подземных вод на водозаборном сооружении в пределах данного района (на заданный срок эксплуатации) за счет привлечения различных источников их формирования, входящих в правую часть общего балансового уравнения (4.1). При этом каждый из возможных источников формирования эксплуатационных запасов оценивается раздельно, а затем производится их суммирование.

При использовании балансового метода водный баланс участка (района) рассматривается в целом по приходным и расходным частям на его границах. В связи с этим балансовый метод позволяет определить только общее среднее прогнозное снижение уровней продуктивного горизонта, а не понижение уровня воды в водозаборных скважинах. Нельзя балансовыми методами определить и возможную производительность скважины. Все это предопределяет необходимость использования балансового метода главным образом как дополнительного методического приема в сочетании с гидродинамическим и гидравлическим методами.

В то же время только балансовым методом можно установить роль отдельных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и оценить обеспеченность запасов, подсчитанных другими методами. Поэтому применение балансового метода в сочетании с другими методами оценки эксплуатационных запасов является в большинстве случаев весьма целесообразным.

Наиболее самостоятельное значение балансовые методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод имеют на месторождениях, приуроченных к ограниченным по площади структурам с большой водопроводимостью продуктивного горизонта.

В таких структурах депрессионная воронка при эксплуатации быстро распространяется на всю площадь водовмещающей структуры, причем понижения уровня в центре площади и на ее периферии отличаются незначительно. В этом случае оценка балансовым методом приходных статей баланса может характеризовать степень обеспеченности эксплуатационных запасов.

Кроме того, балансовым методом производится оценка эксплуатационных запасов подземных вод тогда, когда их использование проектируется путем непосредственного каптирования родников. При этом оценка эксплуатационных запасов состоит в определении режима расхода родников во времени с использованием данных стационарных наблюдений за режимом родникового стока. Как отмечалось выше, эксплуатационные запасы, рассчитываемые по родниковому стоку, должны соответствовать его минимальному 30-дневному или среднегодовому стоку годов 85-, 90- и 95 %-ной обеспеченности.

В тех случаях, когда стационарные наблюдения являются непродолжительными, для прогнозной оценки запасов можно использовать данные по роднику-аналогу с более длительным сроком режимных наблюдений или по величине атмосферных осадков, установив предварительно корреляционную связь между расходом изучаемых родников и расходом родников-аналогов или атмосферными осадками. С этой целью рекомендуется применять методы парной и множественной корреляции, широко используемые при прогнозах естественного режима подземных вод.

Если при оценке эксплуатационных запасов подземных вод отдельных (локальных) участков балансовые методы имеют вспомогательное значение, то при региональной оценке эксплуатационных ресурсов подземных вод их роль значительно возрастает, особенно при проектном площадном размещении водозаборов по сетке.

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ

Каждый из рассмотренных выше методов — гидродинамический, гидравлический и балансовый имеют свои достоинства и недостатки. Поэтому наиболее целесообразным является для оценки эксплуатационных запасов подземных вод совместное применение нескольких методов. Выбор методов определяется конкретными гидрогеологическими условиями того или иного месторождения и степенью их изученности.

Как показывает практика, весьма эффективным в этом отношении является сочетание гидродинамического и гидравлического методов оценки эксплуатационных запасов для месторождений подземных вод, на площади которых распространены неоднородные по фильтрационным свойствам водоносные горизонты. В этом случае гидравлическим методом определяется

понижение уровня при проектном дебите скважины и срезки уровней от взаимодействующих скважин на период времени, соответствующий продолжительности опытных работ. Дополнительное понижение уровня во времени $\Delta S(t)$ в зависимости от граничных условий водоносного горизонта в том случае может быть определено гидродинамическим методом.

Так, для расчетной схемы неограниченного в плане пласта дополнительное понижение уровня воды в скважине может быть рассчитано по формуле

$$\Delta S(t) = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi (km)_{\text{ср}}} \ln \frac{t_{\text{э}}}{t_{\text{о}}}, \qquad (16.89)$$

где $(km)_{\text{ср}}$ — среднее значение водопроводимости продуктивного горизонта; $t_{\text{э}}$ — расчетный период эксплуатации; $t_{\text{о}}$ — продолжительность опытных откачек при разведке; $Q_{\text{сум}}$ — общая производительность водозаборного сооружения.

Для расчетной схемы полуограниченного пласта с непроницаемым контуром формула примет вид

$$\Delta S(t) = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi (km)_{\text{ср}}} \ln \frac{t_{\text{э}}}{t_{\text{о}}}. \qquad (16.90)$$

По формулам (16.92), (16.93) определяется дополнительное понижение от работы всего водозабора за период от окончания опытных работ до конца периода эксплуатации. Использование этих формул предопределяет необходимость определения среднего значения водопроводимости пласта в области депрессии. Этого можно избежать, если рассчитывать дополнительное понижение уровня от работы каждой скважины в отдельности по формуле

$$\Delta S_i(t) = \frac{Q_{\text{ск}_{\text{э}_i}}}{Q_{\text{ск}_{\text{о}_i}}} (\Delta S_{2_i} - \Delta S_{1_i}) \frac{\ln \frac{t_{\text{э}}}{t_{2_i}}}{\ln \frac{t_{\text{э}}}{t_{1_i}}}, \qquad (16.91)$$

где $\Delta S_i(t)$ — дополнительное понижение уровня в рассматриваемой скважине от работы скважины с номером i с дебитом $Q_{\text{ск}_{\text{э}_i}}$; ΔS_{2_i}, ΔS_{1_i} — срезки уровня в рассматриваемой скважине при откачке из скважины с номером i на моменты времени t_{2_i} и t_{1_i} после начала откачки, проводящейся с постоянным дебитом $Q_{\text{ск}_{\text{о}_i}}$

Рассчитанные дополнительные понижения от каждой скважины (в том числе и от рассматриваемой) — суммируются.

При совместном использовании гидравлических и балансовых методов дебит водозабора определяется гидравлическим методом (непосредственно по данным опытных работ), а его обеспеченность — балансовым.

В особо сложных гидрогеологических условиях, характеризующихся существенной неоднородностью фильтрационных свойств, неравномерностью питания, целесообразно применение всех трех методов.

МЕТОД ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Необходимость ускорить темпы разведки месторождений подземных вод, особенно в сложных природных условиях, во многих случаях предопределяет целесообразность широко использовать для оценки эксплуатационных запасов метод гидрогеологических аналогий. Сущность метода состоит в использовании данных о режиме эксплуатации подземных вод на участках действующих водозаборов для оценки запасов на разведочном участке, находящемся в аналогичных гидрогеологических условиях. Опыт эксплуатации действующего водозабора позволяет учитывать в совокупности влияние всех факторов на формирование эксплуатационных запасов подземных вод. Этот метод может быть использован в следующих направлениях:

а) для непосредственной оценки эксплуатационных запасов подземных вод на разведочном участке по модулю эксплуатационных запасов, определенному по данным работы действующих водозаборов-аналогов;

б) для определения по аналогии отдельных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод с последующим использованием балансовых методов расчета;

в) для определения по аналогии отдельных гидрогеологических параметров, которые не могут быть достаточно достоверно рассчитаны по данным собственно разведочных работ на новом участке (гравитационная водоотдача трещиноватых пород, коэффициент фильтрации слабопроницаемых разделяющих отложений и др.);

г) для корректирования и выбора на разведочном участке расчетной схемы.

Использование метода аналогии возможно только в том случае, когда гидрогеологические условия и источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод в пределах рассматриваемой разведочной площади и эталонного участка действующего водозабора были идентичны.

В связи с этим для обоснования применения метода аналогии между опорным (действующим) и разведочным участками должны быть сопоставимы следующие основные факторы: условия залегания и литологический состав продуктивного водоносного горизонта, граничные условия пласта в плане и разрезе, площадь участков, условия и источники питания подземных вод, возможность использования привлекаемых ресурсов для эксплуатации, характер перекрытия и состав перекрывающих отложений и др.

Так как природные условия месторождений подземных вод являются весьма разнообразными, гидрогеологическая аналогия может быть полной или частичной. При полной аналогии идентичность гидрогеологических условий в пределах опорного аналога и разведочного участка должна быть установлена для всех основных перечисленных выше факторов, определяющих величину эксплуатациоиных запасов подземных вод в данных природных условиях: при частичной аналогии допускается идентичность только по некоторым из этих факторов.

При полной гидрогеологической аналогии оценка эксплуатационных запасов на разведочном участке может быть произведена по величине модуля эксплуатационных запасов подземных вод для участка действующего водозабора. Под модулем эксплуатационных запасов понимается расход подземных вод, который может быть получен с единицы площади депрессионной воронки или с единицы длины реки (при работе водозаборов инфильтрационного типа) в единицу времени. Модуль обычно определяется по режимным данным работы действующих водозаборов. Эксплуатационные запасы подземных вод на разведочном участке определяются умножением расчетного модуля на площадь или длину участка. При этом должны быть сравнимы допустимая и расчетная величины понижения уровня и значения водопроводимости пласта.

Если площади и число скважин на сопротивляемых участках примерно равны, то понижение уровня воды в скважине весьма приближенно может быть рассчитано по следующим зависимостям (для условий установившегося движения потока):

для напорных вод

$$S_2 = S_1 \frac{Q_2 k_1 m_1}{Q_1 k_2 m_2}; \qquad (16.92)$$

для безнапорных вод

$$S_2 = H_2 - \sqrt{H_2^2 - S_1 (2H_1 - S_1) \frac{Q_2 k_1}{Q_1 k_2}}, \qquad (16.93)$$

где S_2 — расчетная величина понижения уровня на разведочном участке; S_1 — фактическое понижение уровня воды в скважинах действующего водозабора; $k_1 m_1$; $k_2 m_2$ — значения проводимости пласта для соответственно действующего и разведочного участков; Q_1, Q_2 — дебит водозаборов соответственно действующего и разведываемого участков; H_1, H_2 — мощность безнапорного продуктивного горизонта на участках соответственно действующего и разведываемого водозаборов.

При частичной аналогии между разведочным участком и действующим водозабором оценка эксплуатационных запасов подземных вод проводится по приведенным выше методам (гидродинамическим, балансовым или гидравлическим), с помощью

которых определяют для разведочного участка отдельные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод, гидрогеологические параметры продуктивного горизонта или проводят корректировку расчетной схемы.

Таким образом, использование метода гидрогеологической аналогии предопределяет обязательное проведение некоторых объемов разведочных работ на новом участке, основной целью которых является установление идентичности и сравнительной оценки условий формирования эксплуатациоиных запасов подземных вод. При этом оценку эксплуатационных запасов с использованием метода гидрогеологической аналогии рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

а) изучается участок эксплуатации подземных вод на действующем водозаборе, который по своим гидрогеологическим данным может служить аналогом для новых разведочных участков;

б) проводится анализ режима эксплуатации этого действующего водозабора для выявления основных источников формирования эксплуатационных запасов и основных факторов, определяющих закономерности движения подземных вод к водозаборным сооружениям;

в) в пределах новой площади проводятся в небольшом объеме разведочные работы для получения доказательств полной или частичной идентичности условий формирования запасов подземных вод на эталонном и разведуемом участках;

г) на основании анализа и результатов проведенных работ выбирается метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ОРОШЕНИЯ

Основным отличием оценки эксплуатационных запасов подземных вод для целей орошения земель является необходимость учета прерывистого режима водоотбора. Известно, что водозаборы подземных вод при орошении эксплуатируются только в вегетационный период, причем и в период вегетации расход водозаборов также не остается постоянным.

Учет прерывистого режима эксплуатации при работе водозаборов в гидрогеологических условиях, отвечающих расчетным схемам неограниченных пластов и пластов, ограниченных непроницаемыми контурами, где основным источником формирования эксплуатационных запасов являются естественные запасы, целесообразно проводить с использованием следующего приближенного приема. Реальное изменение водоотбора в течение всего расчетного периода схематизируется таким образом, при котором принимается, что все годы, кроме последнего, водозабор работает непрерывно со среднегодовой производительностью, а в последний год учитывается истинный график водоотбора.

При этом конец расчетного периода должен совпадать с концом периода максимального водоотбора.

Расчетная зависимость для случая, при котором в последний год учитываются два периода водозабора с разными значениями дебита Q_1 и Q_2, может быть представлена в следующем виде:

$$S_{\text{вп}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{2\pi km} \ln \frac{R_n}{R_0} + \frac{Q_{\text{ср}} - Q_1}{2\pi km} \ln \frac{R_n'}{R_0} + \frac{Q_2 - Q_1}{2\pi km} \ln \frac{R_n''}{R_0}; \quad (16.94)$$

$$R_n = 1{,}5\sqrt{a(t + t_1 + t_2)}; \quad (16.95)$$

$$R_n = 1{,}5\sqrt{a(t_1 + t_2)}; \quad (16.96)$$

$$R_n = 1{,}5\sqrt{at_2}, \quad (16.97)$$

где $Q_{\text{ср}}$ — среднегодовой дебит водозабора; t — время работы водозабора с дебитом $Q_{\text{ср}}$ принимается равным $(n-1)\,365$ (n — число лет, на которое рассчитывается водозабор); Q_1 и Q_2 — соответственно дебит водозабора в периоды времени t_1 и t_2.

$Q_{\text{ср}}$ определяется по формуле

$$Q_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{n} Q_i t_i / 365. \quad (16.98)$$

Формула (16.101) справедлива для моментов времени, отвечающих критериям, приведенным для формулы (12.1), а для ограниченных пластов и условиям, указанным в формуле (16.18) (при $\Delta L = 0$) и (16.11), (16.13). Обычно первый член уравнения (16.41) в связи с большой величиной t позволяет использовать приведенные расчетные зависимости. Второй и третий члены уравнения (16.41) могут не отвечать временным ограничениям. В этих случаях для расчетов следует пользоваться графиками, приведенными в работе Н. Н. Биндемана и Л. С. Язвина [4].

Если в формировании эксплуатационных запасов подземных вод существенную роль играют естественные и искусственные ресурсы (например, краевые части артезианских бассейнов, конусы выноса предгорных шлейфов и межгорных впадин), то в зависимости от площади месторождения и размещения водозаборов на этой площади могут быть даны следующие рекомендации по оценке эксплуатационных запасов подземных вод с учетом прерывистого режима для целей орошения земель.

1. Для месторождений очень большой площади, при расположении водозаборов на значительных расстояниях от контуров естественной разгрузки подземных вод учет прерывистой эксплуатации проводится так же, как это показано выше. Естественные ресурсы при этом не учитываются.

2. Для месторождений небольшой площади при расположении водозаборов вблизи зоны естественной разгрузки подземных вод проектный среднегодовой дебит водозабора не должен превышать общую величину естественных и искусственных

ресурсов. В этом случае расчет водозаборов можно проводить по схеме полуограниченного пласта с контуром постоянного напора в зоне естественной разгрузки. В сложных гидрогеологических условиях для оценки запасов целесообразно применение метода математического моделирования.

3. При расположении участков водозаборов вблизи областей естественной разгрузки и среднегодовых дебитах, превышающих естественные ресурсы подземных вод, независимо от размеров месторождения, оценку эксплуатационных запасов следует проводить с применением методов математического моделирования.

В настоящее время расчет водозаборов для орошения в тех случаях, когда общий отбор воды в году не превышает годовых естественных ресурсов, часто проводится только на расчетный срок, равный вегетационному периоду. При этом должно быть доказано, что в невегетационный период будет происходить полное восполнение сработанных запасов. Если строгих доказательств восполнения запасов нет, то этот методический прием является сугубо приближенным и может быть рекомендован только для ориентировочных оценок по низким категориям (C_1 и C_2).

В заключение отметим необходимость изучения в каждом конкретном случае разведки месторождений балансовой структуры эксплуатационных запасов подземных вод. Под балансовой структурой следует понимать соотношение генетически различных количественных категорий подземных вод, формирующихся при эксплуатации водозаборного сооружения. Как отмечалось выше, такими источниками формирования балансовой структуры могут быть естественные ресурсы, естественные запасы, упругие запасы, привлекаемые ресурсы и искусственное восполнение эксплуатационных запасов подземных вод. Оценка балансовой структуры эксплуатационных запасов подземных вод необходима для того, чтобы обеспечить выбор более целенаправленного проведения различных видов разведочных работ на изучаемом объекте.

Как неоднократно подчеркивалось, в естественных условиях залегания любой водоносный горизонт в гидродинамическом отношении представляет собой сбалансированную систему. Подземные воды в этой системе имеют свои области и источники питания, установившиеся взаимоотношения водоносных пород с окружающей средой, области накопления и естественного стока. При эксплуатации водозаборного сооружения в пределах площади его влияния неизбежно происходит принципиальная перестройка структуры естественно сбалансированной водоносной системы. В общем виде характер этого изменения может быть выражен уравнением, предложенным Р. С. Штенгеловым в 1978 г.:

$$Q_э = \frac{\Delta V_e}{T} + \Delta Q_р + \Delta Q_п, \qquad (16.99)$$

где $Q_э$ — эксплуатационный дебит водозаборного сооружения за время T; $\Delta V_е$ — изменение объема воды в пласте за время эксплуатации; $\Delta Q_р$; $\Delta Q_п$ — соответственно изменение расхода естественной разгрузки и питания водоносного горизонта в пределах области депрессионной воронки.

Рассмотрим несколько примеров формирования балансовой структуры эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборных участках, расположенных в условиях различных месторождений.

На месторождении подземных вод речных долин, где подземные воды гидравлически связаны с поверхностными водами (подпертый режим фильтрации из реки), может быть принята расчетная схема полуограниченного пласта, в которой реку рассматривают как границу с постоянным напором. При наличии естественного потока в водоносном горизонте в начальный период эксплуатации дебит водозабора формируется за счет естественных запасов пласта, затем по мере развития депрессионной воронки будут вовлекаться естественные ресурсы; наконец, при достижении депрессией границы пласта у реки на водозаборе начнется береговая инфильтрация, т. е. привлечение поверхностных вод, падение уровня в скважинах замедлится, а затем через определенное время уровни стабилизируются, наступит стационарный режим фильтрационного потока. В этих условиях дебит водозабора будет формироваться за счет двух источников — естественных и привлекаемых ресурсов. При этом в реальных условиях роль привлекаемых ресурсов будет намного существеннее, чем естественных ресурсов надземных вод водоносного горизонта.

В работе [5] приводятся расчетные данные, характеризующие изменение во времени эксплуатационных запасов подземных вод (по отдельным источникам их формирования) для инфильтрационного водозабора, представляющего собой линейный ряд скважин большой протяженностью, расположенного вдоль берега реки на расстоянии 100 м от нее. Расчеты были выполнены при значении коэффициента уровнепроводности $4 \cdot 10^3 м^2/сут$.

В табл. 17 приводятся результаты расчетов.

Как следует из данных таблицы, начиная с десятых суток работы водозабора, его дебит существенно формируется за счет привлекаемых запасов — вначале 62, а затем до 87—90 %. Отсюда следует очень важный вывод о том, что в процессе разведки такого типа месторождения основное внимание должно быть уделено изучению фильтрационных свойств водоносного горизонта, условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод, определению основных гидрогеологических параметров, характеризующих эти связи (A_0, ΔL, k_0, m_0), режима речного стока, а также качества поверхностных вод.

На участках инфильтрационного водозабора может произойти отрыв депрессионной воронки от реки. После отрыва уровня от подошвы русловых отложений реки и возникновения свободного

режима фильтрации на водозаборном участке произойдет перестройка механизма формирования привлекаемых запасов и их количественные изменения в общей балансовой структуре. При незначительном сопротивлении подрусловых отложений реки основное значение в балансовой структуре эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном сооружении принадлежит привлекаемым ресурсам. В таких условиях можно рассчитывать на организацию сосредоточенного водоотбора. При слабой водопроницаемости подрусловых образований роль привлекаемых ресурсов на водозаборном участке таким образом может быть снижена, целесообразно поэтому создавать в таких условиях рассредоточение водозаборной системы.

Таблица 17. Изменение во времени дебита инфильтрационного водозабора (в процентах, по отдельным источникам формированиия)

Время, сут	Естественные запасы	Ресурсы	
		естественные	привлекаемые
0,1	100	0	0
0,2	98	2	0
0,5	90	10	0
1,0	74	10	16
10,0	28	10	62
100,0	9	10	81
1000,0	3	10	87
∞	0	10	90

Учитывая эти важные положения, в процессе изучения месторождения целесообразно выполнять предварительные расчеты дебита водозаборных сооружений. Результаты такой предварительной оценки могут позволить обосновать наиболее рациональный комплекс и объемы разведочных работ на месторождении.

На тех же месторождениях подземных вод речных долин, но в условиях затрудненной гидравлической связи с поверхностными водами, а также в тех случаях, когда поверхностный сток действует в году периодически, формирование источников эксплуатационных запасов на инфильтрационном водозаборе будет иметь более сложный характер. В период действия поверхностного потока, намного превышающего производительность водозабора, дебит его будет формироваться, как и в предыдущем случае, путем привлекаемых и естественных ресурсов. В период же отсутствия в реке поверхностного стока на водозаборном участке будет происходить сработка естественных запасов подземных вод, накопленных в продуктивном горизонте в водоносных породах вышележащего слоя. В паводковое время сработанные запасы могут быть возобновлены. Все это необходимо учитывать при разведке месторождений.

В работе [5] приводятся расчеты источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, выполненные для различных фильтрационных схем, применительно к следующим гидрогеологическим условиям:

Расчетная схема I — нижний водоносный напорный пласт, верхний — безнапорный (разделяющие слои слабопроницаемые), при эксплуатации происходит снижение уровня в верхнем пласте (путем перетекания);

Расчетная схема II — оба водоносных пласта являются напорными (разделяющие слои являются слабопроницаемыми).

Расчеты запасов выполнены для условий, когда водозабор заложен в нижнем водоносном горизонте. Параметр слабопроницаемого слоя k_0/m_0 принят равным 10^{-4} 1/сут; водоотдача безнапорного пласта принята — 0,1; упругая водоотдача напорного пласта — 0,001. Результаты расчета приведены в табл. 18.

Таблица 18. Изменение во времени эксплуатационных запасов подземных вод в неоднородно-слоистых пластах (в процентах)

Время, сут	Схема I		Схема II	
	Упругие запасы продуктивного пласта	Привлекаемые ресурсы	Упругие запасы продуктивного пласта	Привлекаемые ресурсы
0,1	100	0	100	0
1,0	100	0	100	0
10,0	63	37	71	29
100,0	10	90	53	47
1000,0	1	99	50	50

Как видно из приведенных примеров, для первой расчетной схемы в формировании эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборе существенную роль играют привлекаемые ресурсы со стороны безнапорного водоносного горизонта; для второй — привлекаемые ресурсы составляют 50 %.

Таким образом, балансовая структура эксплуатационных запасов подземных вод на площади влияния будущего водозабора для каждого конкретного месторождения будет определяться некоторыми особенностями геолого-гидрогеологических и гидрологических условий. Особенности формирования источников эксплуатационных запасов подземных вод различных типов месторождений оказывают влияние на методику их разведки и оценку разведочных запасов.

Глава 17
ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С УЧЕТОМ ИХ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПОЛНЕНИЯ

Выше отмечалось, что искусственное восполнение эксплуатационных запасов подземных вод непосредственно на действующих водозаборах является наиболее эффективным средством

удовлетворения возрастающей потребности в воде, а также защиты подземных вод от истощения и сохранения их качества. Источником искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод служат поверхностные воды рек, озер, водохранилищ, каналов.

В практике разведочных гидрогеологических работ чаще всего могут быть два наиболее распространенных способа искусственного восполнения эксплуатационных запасов на участках действующих водозаборов: а) строительство на водозаборе специальных инфильтрационных сооружений (инфильтрационных бассейнов, траншей и нагнетательных скважин); б) постоянное и периодическое затопление площади депрессии водозаборного сооружения поверхностными водами с помощью специальных сооружений (направляющих дамб и др.).

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод в условиях их искусственного восполнения выполняется главным образом гидродинамическим методом (аналитическими расчетами) или методом математического моделирования. Реже применяются гидравлический метод и метод аналогии.

Рассмотрим оценку эксплуатационных запасов подземных вод гидродинамическим методом на действующем водозаборе с учетом искусственного их восполнения путем питания из открытых инфильтрационных сооружений. Оценку можно выполнить по двум вариантам. По первому варианту общая площадь искусственной инфильтрации поверхностных вод и количество инфильтрационных бассейнов на водозаборном участке определяются заранее. Решение такой задачи можно выполнить исходя из заданной общей производительности сооружений (с учетом искусственного восполнения) и наличия на водозаборном участке необходимой площади для размещения проектируемых инфильтрационных бассейнов.

Исходя из этих условий оценка запасов сводится к определению возможного дебита водозабора с учетом намечаемой системы искусственного питания (с учетом общей производительности инфильтрационных сооружений). По второму варианту заранее принимается общая производительность действующего (или разведываемого) водозабора с учетом дополнительной заявленной потребности в воде, которую необходимо обеспечить с помощью системы сооружений искусственного питания.

В этом варианте оценка эксплуатационных запасов подземных вод сводится к определению общей производительности инфильтрационных сооружений (их числа, общей площади, примерных размеров бассейнов), которая может обеспечить искусственным питанием заданную новую производительность водозабора.

Аналитические расчеты запасов целесообразно выполнять для двух наиболее часто встречающихся условий: 1) для гидрогеологических условий, отвечающих расчетной схеме неограни-

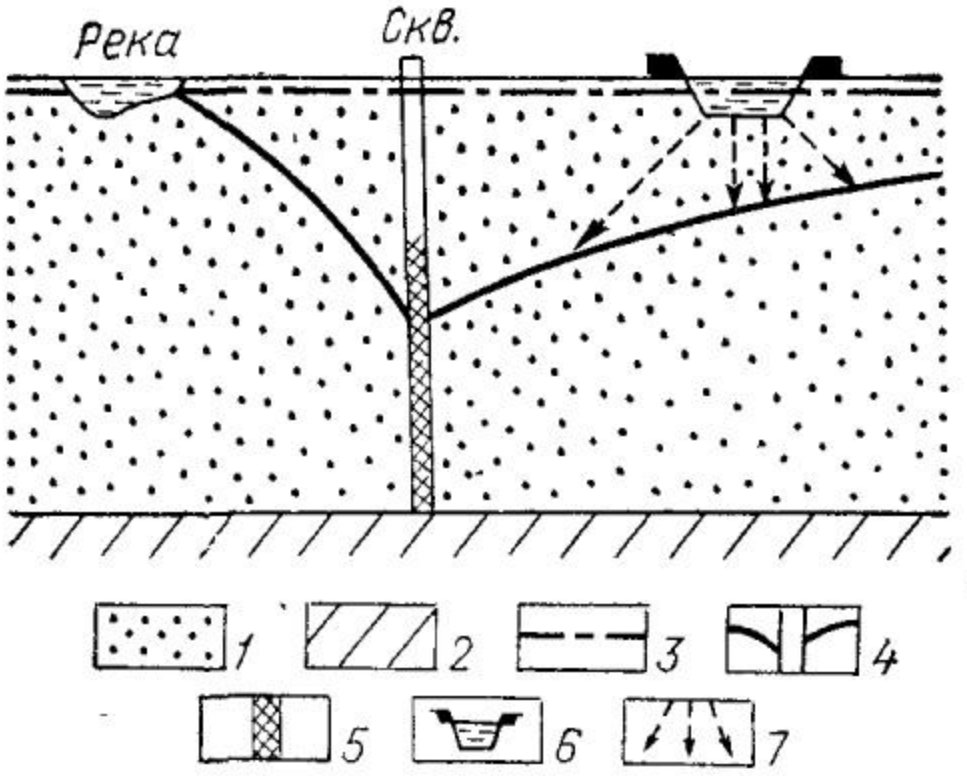


Рис. 47. Схема искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод с помощью инфильтрационных бассейнов.

1 — водоносные породы; *2* — водонепроницаемые породы; *3* — естественный уровень подземных вод; *4* — депрессионная воронка; *5* — водозаборная скважина с фильтром; *6* — инфильтрационный бассейн; *7* — направление инфильтрации из бассейна

ченного в плане пласта, когда водозаборное сооружение на участке представлено в виде линейного ряда скважин и параллельно ему располагается ряд инфильтрационных бассейнов для искусственного питания (рис. 47); 2) для гидрогеологических условий, отвечающих расчетной схеме, при которой каптажное сооружение располагается между рекой и рядом инфильтрационных бассейнов (см. рис. 47).

Рассмотрим аналитические расчеты по первому варианту оценки запасов с искусственным восполнением. Опыт эксплуатации инфильтрационных сооружений при искусственном восполнении запасов подземных вод показывает, что в приемной части бассейна (фильтрующий слой бассейна) всегда происходит формирование слабопроницаемой среды (за счет кольматации и заиления), изменение характера взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

Как показано В. М. Шестаковым [32], в этих условиях инфильтрационный поток из бассейна (река, канал) можно представлять в виде линейного стока с единичным расходом, равномерно распределенным по длине бассейна.

При таких условиях величину единичного расхода свободной фильтрации из бассейна или реки можно оценить как произведение ширины их водного зеркала на среднюю скорость фильтрации:

$$q_б = 2b_б v_б, \tag{17.1}$$

где $q_б$ — единичный расход свободной инфильтрации воды из бассейна; $2b_б$ — ширина бассейна; $v_б$ — скорость инфильтрации из бассейна.

Если инфильтрационные бассейны располагаются в виде линейного ряда общей протяженностью λ, меньшей, чем длина линейного ряда водозаборных сооружений $2l$, при расчете единичного расхода необходимо учитывать поправочный коэффициент $\lambda/2l$, т. е.

$$q_б = 2b_б v_б \frac{\lambda}{2l}. \tag{17.2}$$

При определении единичного расхода инфильтрационного потока для расчетов принимается средняя скорость инфильтрации из бассейна (рис. 48). Этот параметр необходимо оценивать по данным опытно-фильтрационных исследований [26].

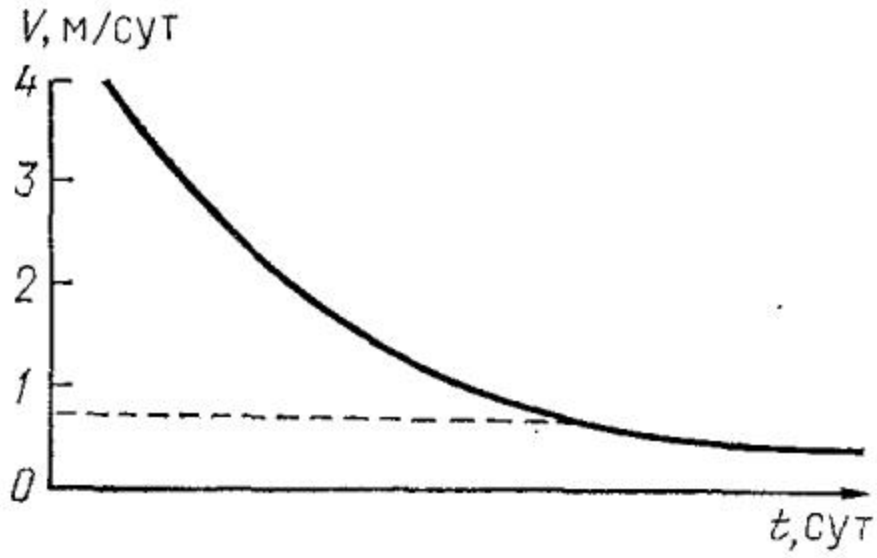


Рис. 48. График изменения скорости инфильтрации во времени.

Пуиктиром дана приистая в расчет средняя скорость инфильтрации

Изменение скорости инфильтрации во времени (от начала работы бассейна до предельно допустимого ее значения) определяет так называемый фильтроцикл бассейна. После завершения фильтроцикла бассейн обычно ставят на ремонт для очистки от илистой пленки и закольматированного слоя.

В порядке примера рассмотрим наиболее общий случай искусственного восполнения эксплуатационных запасов подземных вод, когда в пласте, не ограниченном в плане, работают водозабор в виде горизонтальной совершенной дрены и параллельно ему линейный контур инфильтрационных бассейнов (каналов, траншей) в виде поглощающей галереи.

При этих условиях, чтобы оценить дебит водозабора, обеспеченный только за счет искусственной инфильтрации, понижение уровня воды по линии водозабора S_0 следует компенсировать его подъемом на величину Δh, при искусственном восполнении. Следовательно, для того чтобы избежать истощения запасов в результате непрерывной их сработки, необходимо постоянно соблюдать условие $S_0 = \Delta h$.

Для режима неустановившейся фильтрации подземных вод в плоском потоке понижение уровня на линии водозаборной горизонтальной дрены можно определить по следующему уравнению:

$$S_0 = \frac{q_г \sqrt{at}}{km\sqrt{\pi}}, \qquad (17.3)$$

где $q_в$ — единичный расход водозаборной дрены на 1 м длины; a — коэффициент уровнепроводности; km — водопроводимость продуктивного пласта; t — продолжительность непрерывной работы водозабора.

Для определения значения повышения уровня подземных вод Δh по линии водозабора за счет искусственного восполнения можно воспользоваться следующим решением А. В. Лыкова (1967 г.):

$$\Delta h = \frac{q_i}{km}\sqrt{at}\cdot \mathrm{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \qquad (17.4)$$

где q_i — единичный расход системы искусственного восполнения;

x — расстояние от линии водозабора до центра инфильтрационных сооружений; $\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ — специальная функция, определяемая по таблицам Ф. М. Бочевера (1968 г.).

Если приравнять значения S_0 и Δh, то получим зависимость для оценки единичного дебита водозабора, обеспеченного лишь искусственным восполнением запасов подземных вод:

$$q_в = q_i \alpha, \tag{17.5}$$

где α — коэффициент использования искусственных ресурсов подземных вод,

$$\alpha = \sqrt{\pi} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right). \tag{17.6}$$

В практике гидродинамических расчетов значения $2\sqrt{at}/\pi$ и $2\sqrt{at}\ \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$ в формулах (17.4) и (17.6) принято выражать в виде условных радиусов действия $L_в$ и $L_б$. В плоском фильтрационном потоке на водозаборе

$$L_в = 2\sqrt{at}/\sqrt{\pi} = 1{,}128\sqrt{at}. \tag{17.7}$$

В инфильтрационных бассейнах линейного ряда

$$L_б = 2\sqrt{at} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right). \tag{17.8}$$

В этом случае единичный расход водозабора при искусственном восполнении запасов подземных вод с помощью инфильтрационных бассейнов будет

$$q_в = q_б \frac{L_б}{L_в}. \tag{17.9}$$

Полный дебит водозабора Q_l при его принятой длине $2l$ составит

$$Q_l = 2lq_б L_б / L_в. \tag{17.10}$$

Величину коэффициента эффективности искусственного восполнения запасов подземных вод можно определить из соотношения

$$a = L_б / L_в. \tag{17.11}$$

Коэффициент эффективности характеризует долю искусственно формируемых запасов в общей производительности водозабора. Численно он равен отношению расхода воды, дополнительно поступающей к водозабору, к общему расходу водозабора.

Аналогичным образом с использованием метода сложения фильтрационных течений К. И. Сычевым [27] были получены

расчетные гидродинамические зависимости для оценки общей производительности линейного ряда взаимодействующих скважин водозабора, питание которого кроме естественных ресурсов осуществляется из специальных систем искусственного восполнения с различными характеристиками граничных условий (взаимосвязи подземных и поверхностных вод). В табл. 19 рассмотрены четыре наиболее распространенные схемы расположения инфильтрационных бассейнов на водозаборных сооружениях.

Таким образом, оценка эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном участке с учетом их искусственного

Таблица 19. Расчетные зависимости для оценки эксплуатационных запасов подземных вод на действующих водозаборах с учетом их искусственного восполнения

Водозабор и система искусственного восполнения (граничные условия)	Расчетные зависимости для оценки	
	дебита водозабора	эффективности искусственного восполнения
Линейный ряд водозаборных скважин, ряд инфильтрационных бассейнов со свободной инфильтрацией (одна полоса дождевания)	$Q_в = \frac{2lq_б L_б}{L_в + 2L_{кс}}$	$a_и = \frac{L_б}{L_в + 2L_{кс}}$
Линейный ряд водозаборных скважин, расположенных между двумя рядами инфильтрационных бассейнов со свободной инфильтрацией потока (две полосы дождевания)	$Q_в = \frac{2l(q_{б_1} L_{б_1} q + q_{б_2} L_{б_2})}{L_в + 2L_{кс}}$	$a_{и_1} = \frac{L_{б_1}}{L_в + 2h_{кс}}$; $a_{и_2} = \frac{L_{б_2}}{L_в + 2h_{кс}}$
Линейный ряд водозаборных скважин, расположенных между рекой (контур постоянного напора) и рядом инфильтрационных бассейнов со свободной фильтрацией (одна полоса дождевания)	$Q_в = \frac{l(2kmS + q_б L_в)}{L_р + L_{кс}}$	$a_и = \frac{L_б}{2(L_р + L_{кс})}$ при $L_б \leqslant 2L_р$
Линейный ряд водозаборных скважин, расположенных между рекой и рядом инфильтрационных бассейнов (с двумя контурами постоянного напора)	$Q_в = \frac{2lkmS}{\frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} + L_{кс}}$	$a_{и_1} = \frac{L_1 L_2}{L_1 L_2 + (L_1 + L_2) L_{кс}}$; $L_1 = L_{c_1} + \Delta L_1$; $L_2 = L_{c_2} + \Delta L_2$

восполнения по условиям первого варианта (см. выше) должна производиться в следующей последовательности.

1. По данным обработки режимных наблюдений за эксплуатацией водозабора и результатам дополнительных опытно-фильтрационных работ (на участках расположения инфильтрационных бассейнов) необходимо обосновать выбор средних значений гидрогеологических параметров: проводимости пласта km, уровнепроводности a, гидравлического сопротивления русловых отложений ΔL, средней скорости инфильтрации воды из бассейнов $v_и$.

2. Затем надо произвести преобразование гидрогеологических условий водозаборного участка в расчетную схему с учетом искусственного восполнения запасов.

3. Исходя из местных геоморфологических условий водозаборного участка следует выбрать тип инженерных сооружений (бассейнов) и задать их число и размеры (длину $l_б$, ширину $2b_б$ и общую протяженность).

4. С учетом конструктивных данных действующего водозабора (расстояние между скважинами, их радиус) необходимо сделать расчет показателя гидродинамического несовершенства водозабора $L_{кс}$.

5. Затем по данным гидрогеологических параметров $v_б$ и a, выбранных размеров инфильтрационных бассейнов $l_б$ и $2b_б$ и общей длины водозабора $2l$ следует произвести определения: единичного расхода искусственной инфильтрации из бассейнов $q_б$, приведенного радиуса действия водозабора $L_в$, приведенного радиуса действия инфильтрационных бассейнов $L_б$ и расстояния от водозабора $L_б$ с учетом значения гидравлического сопротивления ΔL.

6. При завершении расчетов производится прогнозная оценка дебита водозабора с учетом искусственного восполнения по соответствующим уравнениям, отвечающим расчетной схеме (см. табл. 23). Принято, что значение $S_{доп}$ должно быть не более 0,5—0,7 H_0, где H_0 — мощность продуктивного водоносного горизонта.

Методику оценки эксплуатационных запасов подземных вод на действующем водозаборе с учетом их искусственного восполнения по условиям второго варианта задачи (см. выше) целесообразно рассмотреть на конкретном примере [27].

На участке действующего водозабора естественные ресурсы подземных вод обеспечивают его постоянный дебит в количестве 30 тыс. м³/сут. Согласно дополнительной заявке, необходимо довести общую производительность водозабора до 80 тыс. м³/сут. Дополнительный дебит водозабора $\Sigma Q_{би}$ в количестве 50 тыс. м³/сут может быть получен только путем искусственного восполнения запасов. Действующий водозабор состоит из 20 эксплуатационных скважин ($n = 20$) и имеет общую длину $L_б = b(n-1)$, где расстояние между скважинами $b = 100$ м. Дебит одной скважины при использовании естествен-

ных ресурсов подземных вод составляет 1,5 тыс. м³/сут. Гидрогеологические параметры продуктивного безнапорного водоносного горизонта водозаборного участка характеризуются следующими значениями: мощность $H_0 = 20$ м, коэффициент фильтрации $k = 50$ м/сут, коэффициент уровнепроводности $a = 5000$ м²/сут.

Для решения поставленной задачи на водозаборном участке были проведены дополнительные исследования: а) гидрологические — с целью изучения источника искусственного восполнения и его качества; б) опытно-фильтрационные работы на участках возможного размещения инфильтрационных сооружений с целью определения значения скорости инфильтрации; в) бурение скважин с целью уточнения гидрогеологических условий. В результате этого для последующих расчетов были приняты следующие параметры: скорость инфильтрации 1,2 м/сут, расстояние от линии инфильтрационных бассейнов до водозабора $x_0 = 100$ м; допустимое понижение уровня — половинные мощности водозаборного горизонта $S_{доп} = 10$ м.

Имея, таким образом, все необходимые гидрогеологические данные, требуется определить общую площадь инфильтрации для искусственного восполнения запасов при заданных условиях работы водозабора, количество и размеры инфильтрационных бассейнов, а также дебит каждой водозаборной скважины в условиях дополнительного одностороннего искусственного питания. Решение поставленных задач целесообразно выполнить в следующей последовательности.

Вначале необходимо определить дебит одной водозаборной скважины Q_c в условиях одностороннего искусственного восполнения запасов подземных вод. Эта задача приближенно может быть решена по известной формуле Маскета—Лейбензона:

$$Q_c = \frac{2\pi kmS}{\ln \frac{b}{2\pi x_0} + \frac{2\pi x_0}{b}}, \qquad (17.12)$$

где S — расчетное понижение уровня (равное допустимому); b — расстояние между скважинами; x_0 — расстояние от скважины до середины ряда инфильтрационных бассейнов; km — коэффициент проводимости пласта ($m = H - S/2$).

Подставляя в уравнение (17.12) значения входящих в него параметров для решения рассматриваемого примера, получим $Q_c = 4400$ м³/сут.

Для последующих расчетов дебит одной скважины принимаем равным 4 тыс. м³/сут. Следовательно, имеющиеся на водозаборе эксплуатационные скважины ($n = 20$) могут обеспечить суммарный заданный отбор подземных вод в количестве 80 тыс. м³/сут. Однако для этого потребуется переоборудование скважин более производительными насосами.

Далее для условий непрерывного режима искусственного восполнения запасов подземных вод необходимо определить

значение единичного расхода искусственной инфильтрации из бассейнов. Этот единичный расход водозабора $q_{би}$ будет

$$q_{бн} = \frac{\Sigma Q_{би}}{bn} = \frac{50000}{100 \cdot 20} = 25 \text{ м}^3/\text{сут на 1 м длины водозабора.}$$

Продолжительность непрерывной инфильтрации из бассейнов принимаем равной $t = 10^4$ сут. Затем следует определить значения $L_в$, $L_б$ и $L_{кс}$ соответственно по формулам (17.7) и (17.8):

$$L_в = 1{,}128\sqrt{5000 \cdot 10^4} = 7910;$$

$$L_б = 2\sqrt{5000 \cdot 10^4} \cdot \text{ierfc}\left(\frac{100}{2 \cdot 5000 \cdot 10^4}\right) =$$

$$= 2 \cdot 7071 \cdot \text{ierfc}\,(0{,}014) = 7778 \text{ м};$$

$$L_{кс} = \frac{b}{2\pi} \cdot 2{,}3 \lg \frac{b}{2\pi x_o} = \frac{100}{2 \cdot 3{,}14} \cdot 2{,}3 \frac{100}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2} = 70 \text{ м.}$$

При этих значениях необходимый единичный расход инфильтрационного питания из бассейна $q_б$ будет

$$q_б = q_в \frac{L_в \cdot 2h_{кс}}{h_б} = 25 \cdot \frac{7910 \cdot 2 \cdot 70}{7778} = 25{,}9 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Имея значение $q_б$, можно определить общую площадь искусственной инфильтрации для обеспечения заданной производительности водозабора:

$$F = \frac{q_б bn}{v_и} = \frac{25{,}9 \cdot 100 \cdot 20}{1{,}2} = 43167 \text{ м}^2.$$

Если принять длину одного бассейна $l_б = 180$ м, а расстояние между бассейнами 20 м, то на водозаборном участке (при общей его протяженности 2000 м) необходимо разместить 10 инфильтрационных бассейнов. При этом можно предполагать, что из общего числа бассейнов восемь будут работать постоянно, а два последовательно будут находиться в чистке (в ремонте) донной его части для снятия наиболее закольматированного и заиленного слоя. Тогда средняя ширина инфильтрационных бассейнов $2b_б$ должна составлять

$$2b_б = \frac{F}{2b\,(n-2)} = \frac{43167}{1440} = 30 \text{ м.}$$

В данном рассмотренном примере при искусственном восполнении запасов подземных вод величина понижения уровня $S_{рас}$ на водозаборе принята равной значению $S_{доп}$ и основные гидрогеологические параметры инфильтрационных бассейнов определены непосредственно опытным путем. При таких условиях общую оценку эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения можно считать в высшей степени достоверной.

Для рассмотренного примера категоризацию эксплуатационных запасов можно выполнить следующим образом: а) общий дебит действующего водозабора, определенный по данным многолетних режимных наблюдений за его эксплуатацией, можно отнести к запасам категории А (30 тыс. м³/сут); б) суммарный дебит искусственного восполнения запасов с помощью инфильтрационных бассейнов, учитывая надежный режим источника питания и достоверные результаты разведочных опытных работ, можно отнести к запасам категории В (50 тыс. м³/сут).

Глава 18

ТЕХНОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ВЛИЯНИЕ ОТБОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Современный этап эксплуатации подземных вод в нашей стране характеризуется двумя отличительными признаками: а) интенсификацией отбора подземных вод из недр Земли для целей централизованного водоснабжения и орошения крупных массивов; б) концентрацией водоотбора системами крупных водозаборных сооружений, сосредоточенных на сравнительно небольших площадях.

Интенсивная эксплуатация подземных вод системой сосредоточенных крупных водозаборов всегда формирует в той или иной степени целый комплекс техногенных процессов, влияние которых и приводит к значительному изменению гидрогеологических и инженерно-геологических условий в сфере влияния водозаборного сооружения.

Под техногенными процессами следует понимать тесно связанные между собой гидрогеологические, инженерно-геологические, геокриологические, биогидрогеохимические процессы, формирующиеся под влиянием инженерной деятельности человека и влияющие на свойства основных компонентов геологической среды (горные породы, подземные воды, газы, микроорганизмы) и нередко на окружающую среду в целом. По академику Е. В. Ферсману, совокупность проявления техногенных процессов приводит к формированию в верхней части земной коры различного профиля техногенеза.

Из многочисленных техногенных процессов, формирующихся на водозаборном участке, относительно изученными являются процессы, характеризующие нарушение режима взаимосвязи подземных и поверхностных вод, развитие на водозаборном участке депрессионной воронки, механизм снижения пластового давления продуктивного напорного горизонта, процессы вторичной консолидации осушенных рыхлых пород и др. Для прогноз-

ной оценки этих техногенных процесов в настоящее время разработаны приближенные гидродинамические методы: а) аналитических расчетов; б) методы моделирования процессов на современных АВМ и ЭЦВМ. Механизм формирования таких техногенных процессов, как суффозионно-карстовые, фильтрационно-суффозионные, процессы окисления, биогеохимические процессы и др., изучен очень слабо, методика прогнозной оценки их в настоящее время не разработана, что несомненно, затрудняет прогнозирование этих процессов и своевременное принятие мер защиты от негативного их воздействия на окружающую среду. В этом направлении требуется проведение специальных научно-методических исследований.

При разведке подземных вод очень важно заблаговременно прогнозировать масштабы возможного негативного влияния техногенных процессов на изменение основных компонентов окружающей среды. В этом отношении целесообразно все известные крупные водозаборные сооружения подразделить на три основные группы: 1) расположенные в долинах рек или вблизи водоемов (озер или водохранилищ), дебит которых формируется преимущественно за счет привлекаемых ресурсов (береговая инфильтрация поверхностных вод); 2) на площади бассейнов безнапорных трещинно-карстовых вод карбонатных пород; 3) на площади изолированных от поверхности артезианских горизонтов, где дебит водозаборов формируется преимущественно за счет отбора упругих запасов напорных вод.

Как показывает опыт, при эксплуатации первой группы водозаборных сооружений обычно наблюдаются незначительные изменения окружающей среды. На участках инфильтрационных водозаборов, как правило, очень быстро устанавливается стационарный режим фильтрационного потока; размеры воронки депрессии (сферы влияния) составляют единицы или первые десятки квадратных километров. В таких гидрогеологических условиях техногенные процессы наиболее существенное влияние могут оказать на изменение свойств собственно геологической среды: кольматация и заиление русловых отложений реки, ухудшение ландшафтных условий, изъятие части поверхностного стока и др. В случае загрязнения поверхностных вод устойчивыми химическими компонентами может ухудшиться качество подземных вод на водозаборном участке.

Вместе с тем в долинах рек, не имеющих постоянно действующих поверхностных водотоков, когда отсутствует питание подземных вод, депрессионная воронка при эксплуатации групповых водозаборов может развиваться на больших площадях (несколько десятков квадратных километров). В таких условиях отмечается существенное влияние процессов дренирования на режим почвенной влаги, в том числе в прилегающих лесных массивах, что отражается на ландшафтных условиях в целом.

При эксплуатации водозаборных сооружений второй группы весьма интенсивно развиваются суффозионно-карстовые про-

цессы — образование на поверхности воронки обрушения и, как следствие, деформация поверхностных сооружений и подземных коммуникаций.

Наиболее интенсивного изменения окружающей среды можно ожидать при эксплуатации водозаборных сооружений третьей группы. В период сработки упругих запасов четко выражается тенденция постоянного снижения пьезометрических уровней напорных вод; при этом депрессионная воронка нередко достигает по площади нескольких сот квадратных километров, оказывая существенное влияние на формирование таких техногенных процессов, как депрессионное уплотнение песчано-глинистых пород, перекрывающих продуктивные водоносные горизонты напорных вод, процессов взаимодействия между водоносными горизонтами и др. Однако в условиях, когда проявляются процессы взаимодействия между водоносными горизонтами (процессы перетекания со стороны вышележащих водоносных горизонтов и поверхностных вод), на водозаборных сооружениях, расположенных на площади артезианских бассейнов, значительно снижается общая степень воздействия эксплуатации подземных вод на окружающую среду (стабилизируется площадь депрессионной воронки, снижается дренирующее влияние водозабора на окружающую среду, на участке формируется стационарный режим фильтрационного потока).

Рассмотрим весьма кратко механизм некоторых техногенных процессов и их влияние на изменение основных компонентов окружающей среды.

1. Изменение режима взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Наиболее часто оно проявляется на действующих водозаборных сооружениях инфильтрационного типа, на долю которых в нашей стране приходится примерно до 62 % всего отбора подземных вод.

В ненарушенных условиях речные долины играют роль естественных дрен, а водоносные аллювиальные образования — регулировочных емкостей. Эксплуатация инфильтрационных водозаборов всегда приводит к нарушению естественного режима взаимосвязи подземных и поверхностных вод, при этом наибольшее влияние водоотбор может оказать на режим речного стока. Это влияние неоднозначно. Оценка влияния отбора подземных вод на изменение расхода поверхностного водотока является весьма важной задачей при определении общих водных ресурсов той или иной территории и составлении водохозяйственных балансов.

Сокращение речного стока и его изменение во времени определяются многими факторами. В паводковый период отбор подземных вод вообще может не сказаться на режиме поверхностного стока. Таким образом, при эксплуатации инфильтрационных водозаборов должна решаться задача о рациональном комплексном использовании подземных и поверхностных вод. В некоторых случаях поверхностные воды могут иметь техно-

генное загрязнение. Тогда может возникнуть задача по прогнозной оценке возможного загрязнения подземных вод на водозаборном участке.

Все особенности изменения поверхностного стока при эксплуатации инфильтрационных водозаборов необходимо учитывать при разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод. В настоящее время разработаны аналитические решения, позволяющие прогнозировать изменение режима поверхностного стока при эксплуатации подземных вод в речных долинах, находящихся в достаточно простых гидрогеологических условиях (см. гл. 22); в сложных гидрогеологических условиях для этих целей следует применять хорошо разработанные методы математического моделирования.

2. Влияние отбора подземных вод на ландшафтные условия не всегда является однозначным. В одних случаях отбор подземных вод способствует осушению прилегающих переувлажненных земель (заболоченных территорий), предотвращает процессы вторичного засоления почв при орошении земель, в других — интенсивная эксплуатация подземных вод может вызвать негативные последствия в окружающей среде. Снижение уровня подземных вод первого от поверхности водоносного горизонта, связанное с отбором подземных вод, может привести к иссушению почвенного покрова, а следовательно, к угнетению или даже к гибели растительности, переосушению прилегающих сельскохозяйственных угодий, обмелению озер, мелких рек и т. д. Все это может коренным образом повлиять на изменение ландшафтных условий территорий. В связи с этим в подобных случаях возникает необходимость учета экологических последствий отбора подземных вод из недр Земли и разработки комплекса защитных мероприятий по компенсации негативных последствий. В настоящее время научные основы и методы прогнозной оценки влияния интенсивного отбора подземных вод на окружающую среду только начинают разрабатываться. Эта проблема является комплексной: в ее решении должны принимать участие специалисты в области гидрогеологии, инженерной геологии, биологии, географии, почвоведения, ирригации и других наук, изучающих условия природопользования. В целом проблема влияния отбора подземных вод на ландшафтные условия требует проведения фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований.

Такие комплексные исследования, по-видимому, целесообразно организовать в первую очередь на представительных крупных водозаборах.

3. Вторичная консолидация осушенных рыхлых пород и депрессионное уплотнение пород надпродуктивной толщи, возникающие при длительной эксплуатации подземных вод, могут быть объединены в одну группу. Длительные и мощные откачки подземных вод приводят к снятию «взвешивающего» гидростатического давления воды, а следовательно, приводят к увеличе-

нию сил тяжести и возрастанию эффективной нагрузки слоев, что вызывает вторичное их уплотнение и, как следствие, деформацию поверхности, поверхностных сооружений и подземных коммуникаций. Наибольшие оседания поверхности, как показали исследования, отмечаются на водозаборных участках со значительными снижениями уровня подземных вод. Подобные примеры хорошо известны из опыта эксплуатации подземных вод в Японии, США, Нидерландах, Италии, Великобритании, Венесуэле, Мексике и других странах [26]. Наиболее интенсивно вторичная консолидация отмечается в глинистых, суглинистых, сапропелевых, гидрофильных и песчаных отложениях. В зависимости от интенсивности водоотбора и гидрогеологического строения, скорости проседания земной поверхности, как показывает опыт зарубежных стран, достигают до 10—30 см в год, а в отдельных случаях 50—75 см в год. В некоторых районах суммарное проседание земной поверхности за несколько лет составило от 3 до 9 м (города Токио, Осака, Ниагата, Мехико, Хьюстон, Лонг-Бич, Аризона и др.). Подобные катастрофические просадки приводят к образованию на поверхности глубоких трещин, разрывам фундаментов зданий и подземных коммуникаций, затоплению и подтоплению городских территорий, примыкающих к морям, водоемам и речным долинам. Просадки в горных породах, нередко достигающие 22 % от общего объема откачанной воды, являются чаще всего (особенно на первых этапах развития техногенного процесса) следствием лишь упругих деформаций. А поэтому после прекращения водоотбора и восстановления уровней подземных вод проседание не только приостанавливается, но и в некоторых случаях отмечается обратный процесс — подъем земной поверхности. Негативные последствия, вызванные просадками поверхности, могут быть сокращены путем изменения режима водоотбора (сокращение и перераспределение водоотбора, искусственное восполнение запасов подземных вод, нагнетание сжатого воздуха в водоносные горизонты для поддержания пластового давления и др.).

Процесс просадок земной поверхности, несмотря на его сложность и многофакторность, поддается прогнозированию. Эти прогнозы, вытекающие из теории консолидации пород, основаны на численном решении дифференциальных уравнений плановой нестационарной фильтрации и уравнений деформации глинистых грунтов. Подобные расчеты хотя и являются приближенными, однако вполне отвечают запросам практики. Они позволяют в каждом конкретном случае оценивать влияние водоотбора на возможное оседание поверхности, а также составить прогнозные карты развития просадок земной поверхности на водозаборных участках.

Для приближенных расчетов возможного оседания поверхности в процессе осушения рыхлых пород можно воспользоваться следующим уравнением:

$$S = \frac{\Delta\gamma_n \Delta h}{E_y}\left(h_н + \frac{\Delta h}{2}\right), \qquad (18.1)$$

где S — величина оседания (уплотнения) пород; $\Delta\gamma_n$ — увеличение веса зерен грунта вследствие осушения; Δh — осушенная часть водоносного горизонта; E_y — коэффициент уплотнения осушенных пород; $h_н$ — остаточная неосушенная часть водоносного горизонта.

Увеличение веса зерен осушенных пород можно определить по формуле:

$$\Delta\gamma_n = (1 - n)\,\gamma_в,$$

где n — объем осушенных пород; $\gamma_в$ — плотность воды.

Значения E_y приведены в табл. 20.

Таблица 20. Значения коэффициентов уплотнеиия для различиых пород

Породы	Коэффициент уплотнения для пород, МПа		
	разрыхленных	средней плотности	плотных
Песок			
разнозернистый	10—30	30—50	50—80
тонкозернистый	8—12	12—20	20—30
Гравий с песком	30—80	80—100	100—200
Глины мягкие	2—5	5—8	120—200
Грубозернистый ил	5—8	10—15	20—40

4. Суффозионно-карстовые техногенные процессы довольно часто проявляются при длительной эксплуатации трещинно-карстовых вод в древних карстовых полостях карбонатных пород.

Эти процессы проявляются на площади распространения скрытых древних карстовых полостей (не обнажающиеся на поверхности), заполненных слабо водопроницаемыми рыхлыми образованиями. В условиях нарушенного гидрогеологического режима, на участке водозаборного сооружения фильтрационный поток имеет повышенные градиенты. В результате этого интенсивно проявляется эрозионно-суффозионная деятельность трещинно-карстовых вод: происходит разрушение и вынос из древних карстовых полостей мелкозернистого материала. Эрозионная деятельность достигает поверхности, поэтому образуются четко выраженные в рельефе воронки обрушения, с которыми нередко связана деформация прилегающих поверхностных сооружений и подземных коммуникаций. Все это может привести к серьезным авариям и перебоям в работе водозабора. Наблюдениями было установлено, что эти процессы на водозаборных участках развиваются очень медленно (отмечены случаи их проявления через 10—15 лет после начала эксплуатации).

Несмотря на простоту механизма суффозионно-карстовых техногенных процессов, методика их прогнозной оценки в на-

стоящее время не разработана. В связи с этим целесообразно: а) в период разведки месторождений трещинно-карстовых вод проводить специальные геофизические работы и бурение поисковых скважин с целью обнаружения скрытых карстовых полостей, в которых потенциально могут развиваться суффозионно-карстовые процессы; б) провести обобщение и анализ гидрогеологических материалов по опыту эксплуатации близко расположенных к разведочному участку месторождений трещинно-карстовых вод; в) разработать методику прогнозной оценки процесса и мероприятия по предотвращению негативного влияния суффозионно-карстовых процессов на окружающую среду.

Как видно из изложенного выше, на современном этапе постановки поисково-разведочных гидрогеологических работ принципиально новым положением является то, что разведку месторождений подземных вод и оценку их запасов следует рассматривать не как обычную инженерно-техническую задачу, а как комплексную проблему, содержание которой определяется также требованиями рационального их использования и охраны геологической и окружающей среды в целом.

Отсюда и возникают требования к содержанию работ в указанном направлении как на стадии разведки месторождений подземных вод, так и на стадии их эксплуатации. Прежде всего необходимо, чтобы исследования эти носили комплексный характер: гидрогеологические исследования должны проводиться одновременно (и в рациональном сочетании) с инженерно-геологическими исследованиями по единой программе.

Могут быть рекомендованы следующие основные виды работ.

1. Изучение в стадию разведки результатов опыта эксплуатации и техногенных процессов на действующих в аналогичных гидрогеологических условиях водозаборных сооружениях. Анализ собранных гидрогеологических и инженерно-геологических материалов по действующим водозаборам может позволить провести сравнительную оценку условий будущей эксплуатации разведываемого месторождения методом аналогии и наметить исследования с целью сбора дополнительной информации для прогнозной оценки возможного развития техногенных процессов и степени их негативного влияния на изменение окружающей среды.

2. На основании имеющихся данных разведки и проектной производительности водозабора выполнить на изучаемом объекте ориентировочные аналитические расчеты, определяющие возможное развитие по площади районной депрессионной воронки и проанализировать по этой площади геолого-гидрогеологические условия возможного развития тех или иных техногенных процессов. Для месторождений с весьма сложными гидрогеологическими условиями такие задачи целесообразно решать методом предварительного математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ.

В сложных условиях на некоторых объектах может возникнуть необходимость проведения дополнительного рекогносцировочного обследования площади предполагаемого развития депрессионной воронки.

3. Изучение инженерно-геологических условий на участке водозаборного сооружения, предусмотренное требованиями Инструкции ГКЗ СССР [14], целесообразно проводить с учетом прогнозной оценки возможного их изменения под негативным влиянием техногенных процессов.

4. Для прогнозной оценки техногенных процессов, возникающих непосредственно в инженерных сооружениях (в фильтрах буровых скважин, инфильтрационных бассейнах и др.), целесообразно провести на месторождении опытные технологические испытания (а для сложных условий физическое моделирование) их конструкций с тем, чтобы по результатам таких исследований разработать соответствующие рекомендации.

5. Организовать на крупных объектах разведки одновременно с созданием опорной гидрогеологической сети для изучения режима подземных вод опорную инженерно-геологическую сеть (система геодезических реперов) с целью стационарного инструментального наблюдения за изменением инженерно-геологических условий на площади водозаборного участка и предупреждения возможного негативного воздействия техногенных процессов.

6. На стадии эксплуатационной разведки месторождений подземных вод целесообразно продолжить на действующих водозаборных сооружениях стационарные изучения режима техногенных процессов (в общем комплексе режимных гидрогеологических и инженерно-геологических наблюдений) с целью принятия оперативных мер по предотвращению их негативного воздействия на геологическую среду.

ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Под загрязнением пресных подземных вод следует понимать ухудшение их качества при эксплуатации под влиянием процессов проникновения в продуктивный горизонт вредных бактериальных или химических компонентов в количестве, превышающем допустимые нормы по действующему ГОСТ «Вода питьевая».

Возможное загрязнение пресных подземных вод на водозаборном участке чаще всего происходит под влиянием техногенных воздействий (прорыва токсичных промстоков из накопителей, загрязнения подземных вод на орошаемых землях под влиянием миграции ядохимикатов, миграции бактериальных загрязнений с полей орошения и т. д.). В таких условиях возникают сложные условия охраны пресных подземных вод от загрязнений.

Для защиты подземных вод от бактериального загрязнения

на водозаборных участках в настоящее время применяется ряд радикальных средств: биологические факторы, хлорирование и др.

Наиболее сложным и трудноустранимым является химическое загрязнение (органического и неорганического происхождения), при этом наиболее опасны токсичные различные химические соединения.

Для оценки процессов миграций загрязнений в подземных водах вследствие неоднородности среды в пластовых условиях практически можно использовать только приближенные методы, в частности метод так называемого «поршневого вытеснения» загрязнений.

В пластовых условиях при миграции химических загрязнений всегда протекают процессы взаимодействия: а) между жидкими фазами, т. е. между подземными водами и загрязненными растворами (обычно это промстоки); б) между загрязненными растворами и водовмещающими горными породами. Эти процессы характеризуются гидродинамическими и физико-химическими параметрами — водопроводимостью водоносных пород, скоростью гравитационной и диффузионной фильтрации потока, сорбционной способностью пород поглощать загрязняющие компоненты, активной пористостью и др.

Наиболее опасными условиями возможного загрязнения подземных вод являются такие, при которых химические загрязнения попадают непосредственно в область «захвата» водозаборного сооружения (действующего или проектируемого). Область «захвата» каптажного сооружения определяется такой областью общего фильтрационного потока, в которой линии тока направлены непосредственно к эксплуатационным скважинам. В гидродинамическом отношении она четко ограничивается так называемой нейтральной линией (рис. 49). Фильтрационный поток между нейтральной линией и водозабором будет непосредственно направлен

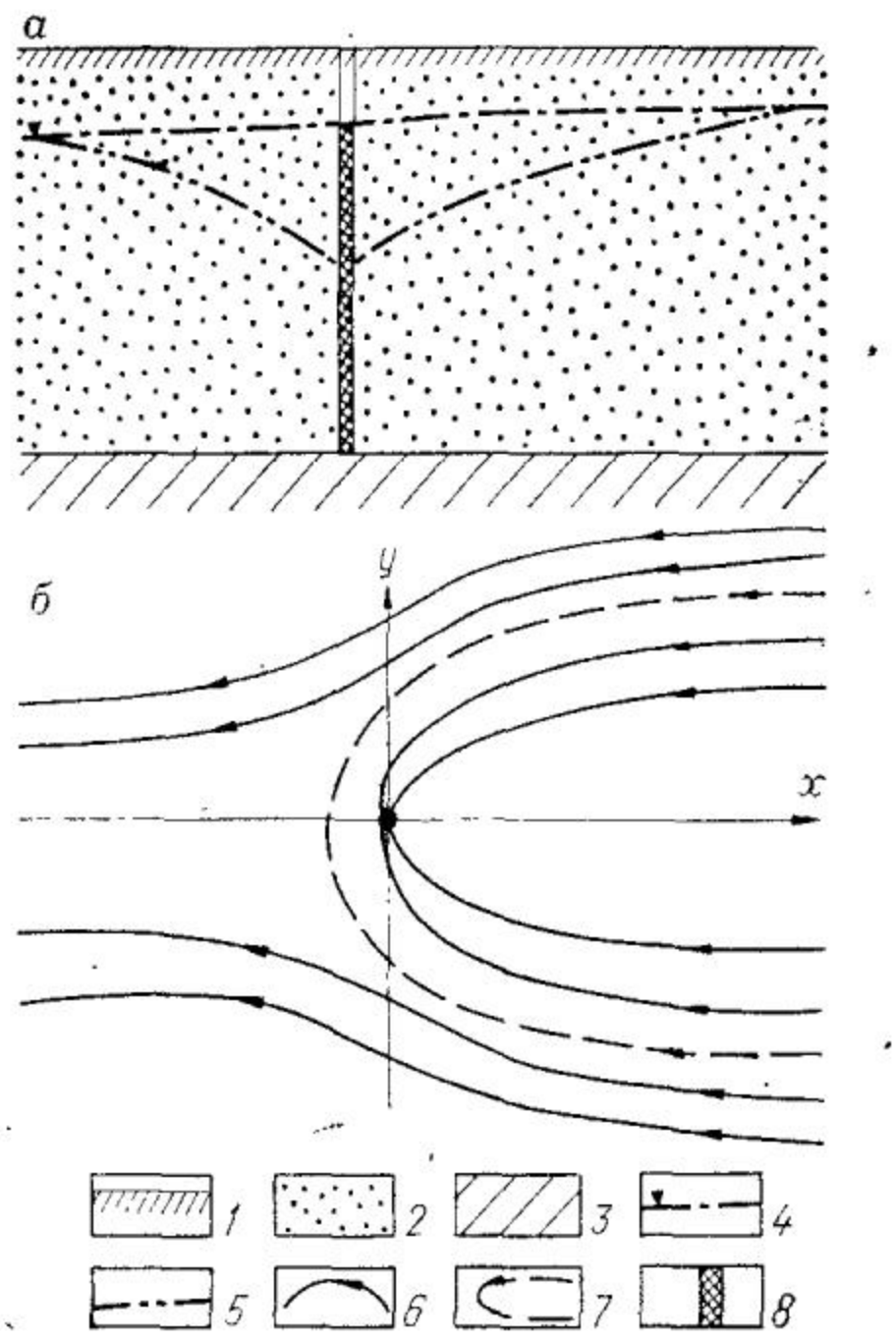


Рис. 49. Формирование «области захвата» водозаборного сооружения в потоке в разрезе (*а*) и в плане (*б*).

1 — почвенный слой; *2* — водоносные породы; *3* — слабопроницаемые породы; *4* — уровень подземных вод в естественных условиях; *5* — кривая депрессии при работе водозабора; *6* — линии тока; *7* — нейтральная линия тока (линия водораздела потока); *8* — скважина с фильтром

к эксплуатационным скважинам. За пределами нейтральной линии поток как бы проскакивает, минуя водозаборное сооружение. При стационарном режиме фильтрации, для которого и производятся расчеты области «захвата», нейтральная граница возмущенного потока остается примерно постоянной во времени. При неустановившемся режиме фильтрации эта граница во времени и в пространстве может постоянно перемещаться.

Таким образом, для прогнозной оценки возможного ухудшения качества подземных вод, которое может произойти под влиянием техногенных загрязнений, необходимо прежде всего определить на водозаборном участке область «захвата». Положение водораздельной точки области «захвата» может быть определено приближенными аналитическими расчетами для водозаборов с простыми граничными условиями. Если заменить линейный ряд скважин, расположенных в неограниченном пласте «большим колодцем», то положение водораздельной точки можно определить по формуле (если длина ряда меньше его расстояния до контура очага загрязнения)

$$x_A = \frac{Q}{2\pi h v_e}; \quad y_0 = \frac{Q}{4 h v_e}; \quad y_1 = \frac{Q}{2 h v_e}, \tag{18.2}$$

где Q — дебит водозаборного сооружения; h — средняя мощность продуктивного водоносного горизонта; y_0 и y_1 — половина ширины области питания соответственно на линии водозаборного сооружения и на значительном удалении от него в верхней части потока; x_A — расстояние водораздельной точки до водозаборного сооружения (начало координат совпадает с водозаборным сооружением, ось x направлена по потоку подземных вод); v_e — скорость фильтрации естественного потока, $v_e = ki$ (k — коэффициент фильтрации; i — уклон потока).

Для линейного ряда большой длины (превышающей расстояние до контура) положение водораздельной точки можно определить по следующей формуле:

$$x_A = \frac{l}{\pi} \operatorname{arth} \frac{Q}{2 h l v_e}, \tag{18.3}$$

где l — расстояние между скважинами; Q — средний дебит взаимодействующей скважины, ось у которой совпадает с линией ряда.

Для линейного ряда скважин, расположенного в полуограниченном пласте в условиях контура питания (река, водохранилище и др.), при наличии естественного потока к этому контуру (например, со стороны верхних террас реки), положение водораздельной точки зоны «захвата» можно определить по следующим зависимостям:

а) для системы «большого колодца»

$$x_A = \sqrt{d^2 - \frac{Qd}{\pi h v_e}}. \tag{18.4}$$

б) для линейного ряда большой длины

$$x_A = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arch}\left(\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} - \frac{Q_o}{hlv_e}\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}\right), \qquad (18.5)$$

где d — расстояние от водозаборных скважин до реки.

При соблюдении следующих соотношений:

а) для «большого колодца»

$$Q/(\pi h d v_e) < 1; \qquad (18.6)$$

б) для линейного ряда скважин

$$Q/(hlv_e) < 1, \qquad (18.7)$$

водораздельная точка будет расположена между водозабором и контуром питания.

При сложных граничных условиях потока прогнозную оценку целесообразно производить с помощью математического метода моделирования на АВМ и ЭЦВМ.

Учитывая, что на действующем водозаборном сооружении всегда создается сеть наблюдательных скважин, область «захвата» водозабора может быть довольно четко определена непосредственно по результатам натурных исследований путем построения детальной карты гидроизогипс.

Если обнаруженный очаг загрязнений при построении сетки фильтрационного потока или карты гидроизогипс окажется в пределах площади «захвата» водозабора, то проникновение загрязнений к водозаборным скважинам неизбежно. Вопрос только во времени продвижения фронта.

Для разработки мероприятий по защите качества подземных вод на водозаборном участке необходимо решать две задачи: а) определить время продвижения фронта загрязненного потока; б) оценить возможную концентрацию токсичных компонентов в пресных подземных водах в разультате загрязнения.

Для линейного ряда взаимодействующих и примерно равнодебитных скважин, расположенных в не ограниченном в плане водоносном горизонте на равных расстояниях друг от друга, время начала подтягивания загрязненных вод со стороны первоначального положения границ раздела (рис. 50) приближенно можно определить по следующему выражению:

$$T = \frac{2n_0 hl}{Q\pi}\left(\frac{\pi x_1}{l} - 0{,}7\right), \qquad (18.8)$$

где Q — дебит отдельной взаимодействующей скважины линейного ряда водозабора; h — мощность водоносного горизонта; n_0 — активная пористость пород продуктивного горизонта (остальные обозначения см. на рис. 50).

Приведенное уравнение действительно при условии, что $x_1/l \geqslant 0{,}5$.

Для условий полуограниченного в плане пласта, например при работе инфильтрационного водозабора, прогнозное время начала подтягивания к водозабору фронта загрязненных вод от

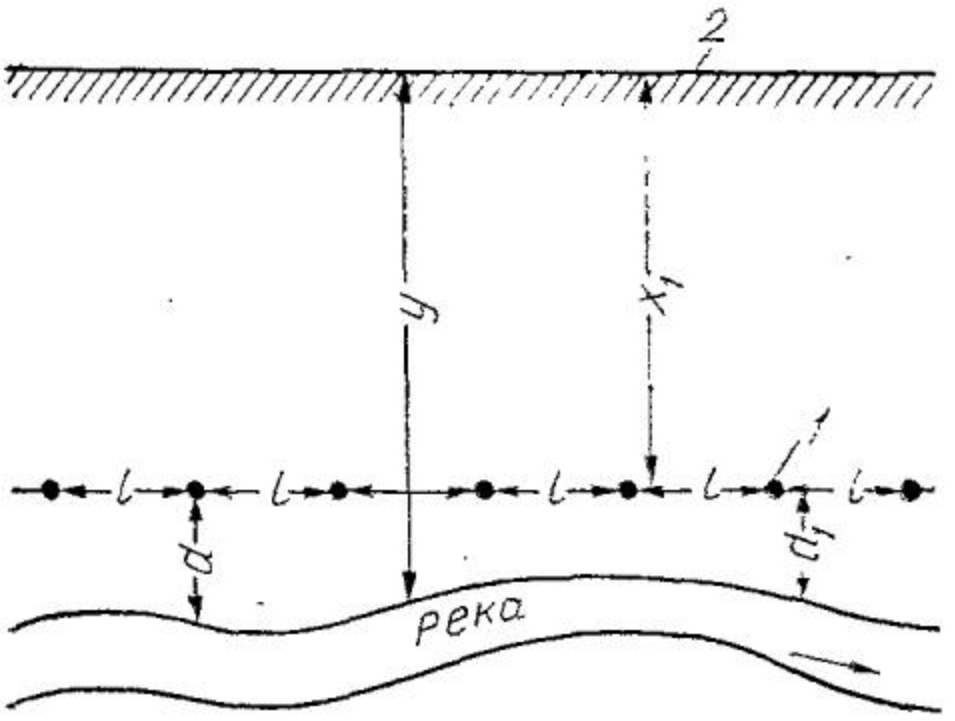


Рис. 50. Схема для расчета времени продвижения загрязнений в условиях полуограниченного пласта.

1 — линейный ряд водозаборных скважин с концентрацией воды C_0; *2* — контур загрязненных подземных вод с концентрацией C_1

очага их распространения (например, на верхней террасе реки) можно определить по следующему выражению:

$$T = \frac{n_0 h l}{Q} \frac{1}{\operatorname{sh} \frac{2\pi b}{l}} \times$$

$$\times \left[\frac{l}{2\pi} \left(\operatorname{sh} \frac{2\pi y}{l} - \operatorname{sh} \frac{2\pi b}{l} \right) - \right.$$

$$\left. - (y - b) \operatorname{ch} \frac{2\pi b}{l} \right], \quad (18.9)$$

где Q — дебит отдельной взаимодействующей скважины линейного ряда водозабора; b — расстояние линейного ряда от реки; l — расстояние между скважинами; y — расстояние от реки до контура загрязненных вод.

Применение указанной выше расчетной зависимости требует выполнения следующих условий: а) линейный ряд скважин на водозаборе имеет сравнительно большую протяженность; б) дебит скважин примерно одинаковый; в) гидравлическая связь подземных вод с рекой хорошая (условия подпертой фильтрации); г) расстояние между скважинами в ряду одинаковое.

Если дебиты водозаборных скважин и расстояние между ними неодинаковы, то в расчетах допускается принимать их среднее значение.

В не ограниченном в плане пласте при отсутствии естественного потока время продвижения контура загрязненных вод к водозаборному участку может быть определено по следующим формулам:

а) для системы «большого колодца»

$$T = \frac{\pi h n_0 x_1^2}{Q}; \quad (18.10)$$

б) для системы линейного ряда

$$T = \frac{2 n_0 h l^2}{\pi Q_0} \ln \operatorname{ch} \frac{\pi x_1}{l}, \quad (18.11)$$

где x_1 — расстояние от контура питания до границы с загрязненными водами.

Как отмечалось выше, вторая задача для прогнозной оценки возможного изменения качества пресных подземных вод заключается в определении возможной концентрации вредных компонентов после смешивания вод продуктивного горизонта с за-

грязнением. В том случае, если загрязненные флюиды по сравнению с пресными водами продуктивного горизонта имеют более высокую степень минерализации и распространены на большой площади влияния водозабора, прогнозную оценку возможного изменения общей минерализации подземных вод можно выполнить по следующей зависимостн (для линейного ряда скважин в не ограниченном в плане пласте):

$$C = C_b + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{l^{bt} - l^{bT}}{l^{bt} - 1}}, \qquad (18.12)$$

где C_0 — минерализация подземных вод продуктивного горизонта; C_1 — минерализация загрязненных подземных вод; T — время начала подтягивания загрязненных вод; t — расчетный момент времени, для которого определяется минерализация воды в водозаборных скважинах $b = Q\pi/(hn_0C^2)$. Приведенное выражение можно использовать при условии, что $t > T$.

Через достаточно большой промежуток времени ($t \gg T$) после начала подтягивания загрязненных вод, предельная минерализация пластовых вод на водозаборе может быть определена по следующему выражению:

$$C_{max} = (C_1 + C_0)/2. \qquad (18.13)$$

В тех случаях, когда предельная концентрация пресных подземных вод оказывается меньше допустимой по ГОСТу, оценки времени подтягивания загрязнений и изменения качества во времени можно не производить.

Что же касается охраны и защиты подземных вод от истощения их запасов, то эти задачи могут быть решены путем выбора наиболее оптимального режима эксплуатации водозаборного сооружения, а также путем искусственного восполнения эксплуатационных запасов на действующем объекте (см. гл. 17). При наличии источника искусственного восполнения для грунтовых вод наиболее эффективны способ создания на водозаборном участке системы инфильтрационных бассейнов вблизи эксплуатационных скважин, а для напорных вод создание на каптажном сооружении системы нагнетательных скважин.

Раздел VI.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Глава 19

МЕТОДИКА РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ СРЕДНЕКЛЯЗЬМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕСТОРОЖДЕНИИ

Среднеклязьминское месторождение относится к четвертому типу рассмотренной выше классификации (см. табл. 4) и в гидрогеологическом отношении представляет собой многопластовую систему, в которой этажно расположенные водоносные горизонты разделяются слабопроницаемыми породами. По природным условиям месторождение характерно для артезианских бассейнов платформенного типа. По степени сложности разведки месторождение можно отнести ко второй группе.

Разведка Среднеклязьминского месторождения подземных вод проводилась с целью выявления дополнительных источников водоснабжения группы крупных городов, расположенных в восточной части Московской области, в связи с резким увеличением общей потребности в воде, истощением запасов в пределах участков действующих наиболее крупных водозаборов и невозможностью их дальнейшего расширения.

Для решения поставленных задач необходимо было выявить новые участки с гидрогеологическими условиями, благоприятными для организации крупных водозаборов с водоотбором в несколько сот тысяч кубометров в сутки. В пределах центральной части Московского артезианского бассейна, где расположено Среднеклязьминское месторождение, наиболее перспективными участками для создания крупных водозаборов с благоприятными условиями формирования эксплуатационных запасов подземных вод являются долины крупных рек, в первую очередь Оки, Клязьмы, Москвы и др. Выявление и разведка таких месторождений в районах, где гидрогеологическая обстановка нарушена под влиянием длительной эксплуатации подземных вод, базируются на материалах изучения общей гидрогеологи-

ческой обстановки и анализа опыта эксплуатации, а также на проведении комплекса дополнительных исследований.

Гидрогеологические исследования в бассейне среднего течения р. Клязьмы на площади более 6 тыс. км² были проведены для решения следующих основных задач*: а) переоценки эксплуатационных запасов подземных вод на участках действующих водозаборов с целью разработки оптимального режима; б) выявления новых перспективных участков, где возможна интенсивная эксплуатация подземных вод в масштабах, позволяющих решить проблему водоснабжения целого ряда крупных водопотребителей без существенного нарушения окружающей природной среды.

Геологическое строение и гидрогеологические условия рассматриваемого месторождения типичны для центральной части Московского артезианского бассейна, где развита система этажно расположенных водоносных горизонтов и комплексов, разделенных слабопроницаемыми глинистыми отложениями (рис. 51, *а*).

Основными продуктивными водоносными горизонтами месторождения являются клязьминско-ассельский и касимовский, залегающие под чехлом рыхлых мезо-кайнозойских пород (рис. 52). Они приурочены к моноклинально залегающим известнякам и доломитам с относительно выдержанными прослоями мергелей и глин. Водоносные горизонты погружаются на северо-восток под углом 3—4°. Моноклинальное залегание пород на отдельных участках осложняется флексурами, поднятиями, прогибами.

Продуктивные водоносные горизонты разделены выдержанной толщей аргиллитоподобных глин щелковского возраста, мощность которых 10—15 м. В районе Губинского поднятия (юго-восточная часть месторождения), где эта толща приподнята на 30—40 м, отмечается усиление трещиноватости и соответственно повышенная проницаемость щелковских глин.

Клязьминско-ассельский водоносный горизонт распространен на большей части рассматриваемой территории. Он характеризуется значительной изменчивостью мощности (от нескольких метров на юге до 110 м на севере) и водопроводимости (от 100 до 6000 м²/сут) водовмещающих пород. Отмечается связь водопроводимости с геолого-структурными факторами: тектоникой, геоморфологией, составом перекрывающих отложений и наличием в них долин размыва. В табл. 21 приводятся геолого-гидрогеологические данные основных водоносных горизонтов района месторождения.

На отдельных участках в южной части месторождения разделяющая мезо-кайнозойский водоносный комплекс и каменноугольные горизонты толща юрских глин размыта. Долины раз-

---

* Работы выполнялись Министерством геологии РСФСР и институтом ВСЕГИНГЕО.

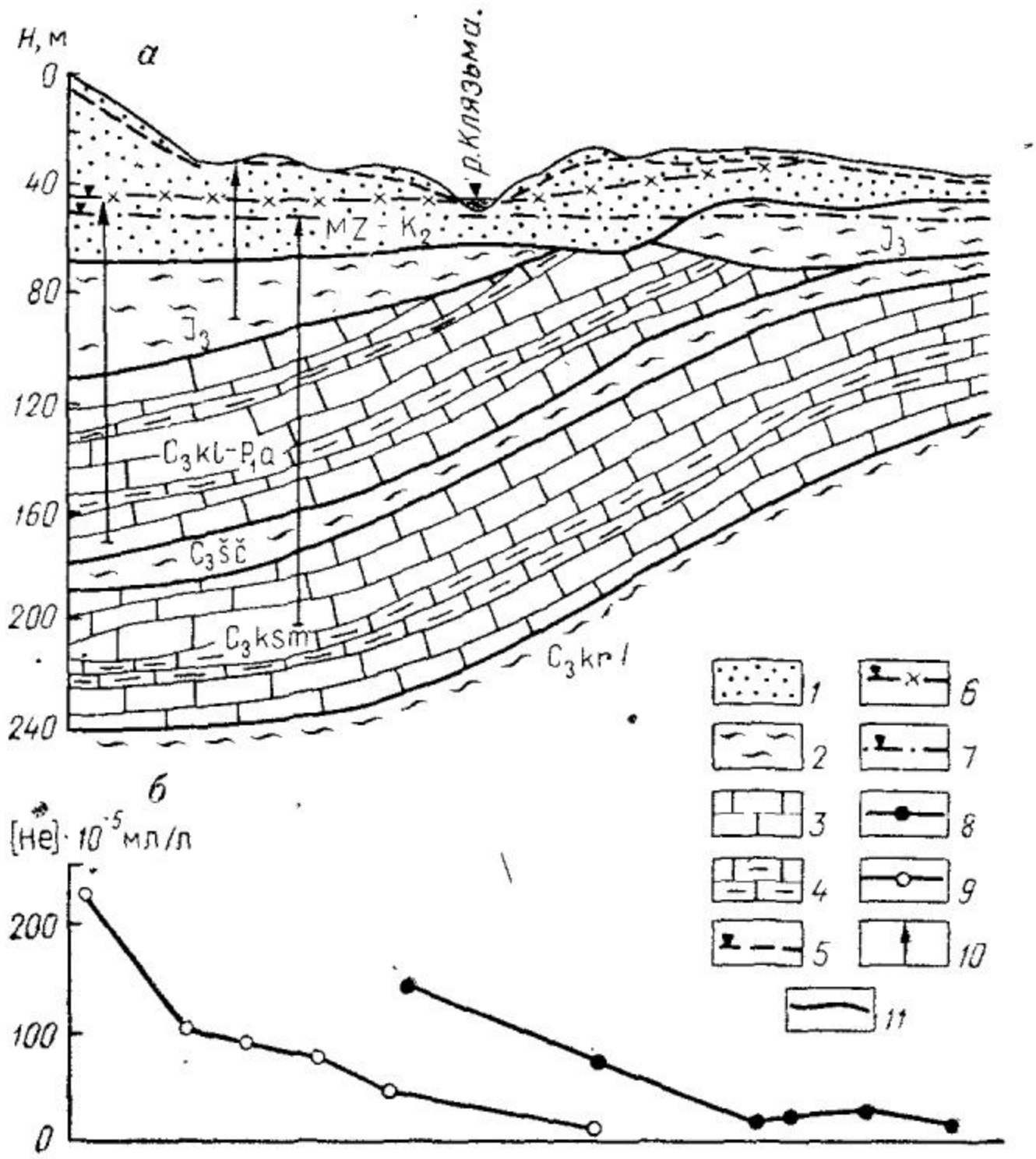


Рис. 51. Схематический геолого-гидрогеологический разрез *(а)* и кривые изменения концентрации гелия по разрезу *(б)*.

1 — пески; *2* — глины; *3* — известняки; *4* — доломиты: *5—7* — уровни подземных вод водоносных горизонтов: *5* — мезо-кайнозойского; *6* — клязьминско-ассельского; *7* — касимовского. *8—9* — кривые изменения содержания He: *8* — для C_3 ksm, *9* — для $C_3kl—P_1a$; *10* — пьезометрический напор; *11* — стратиграфические границы

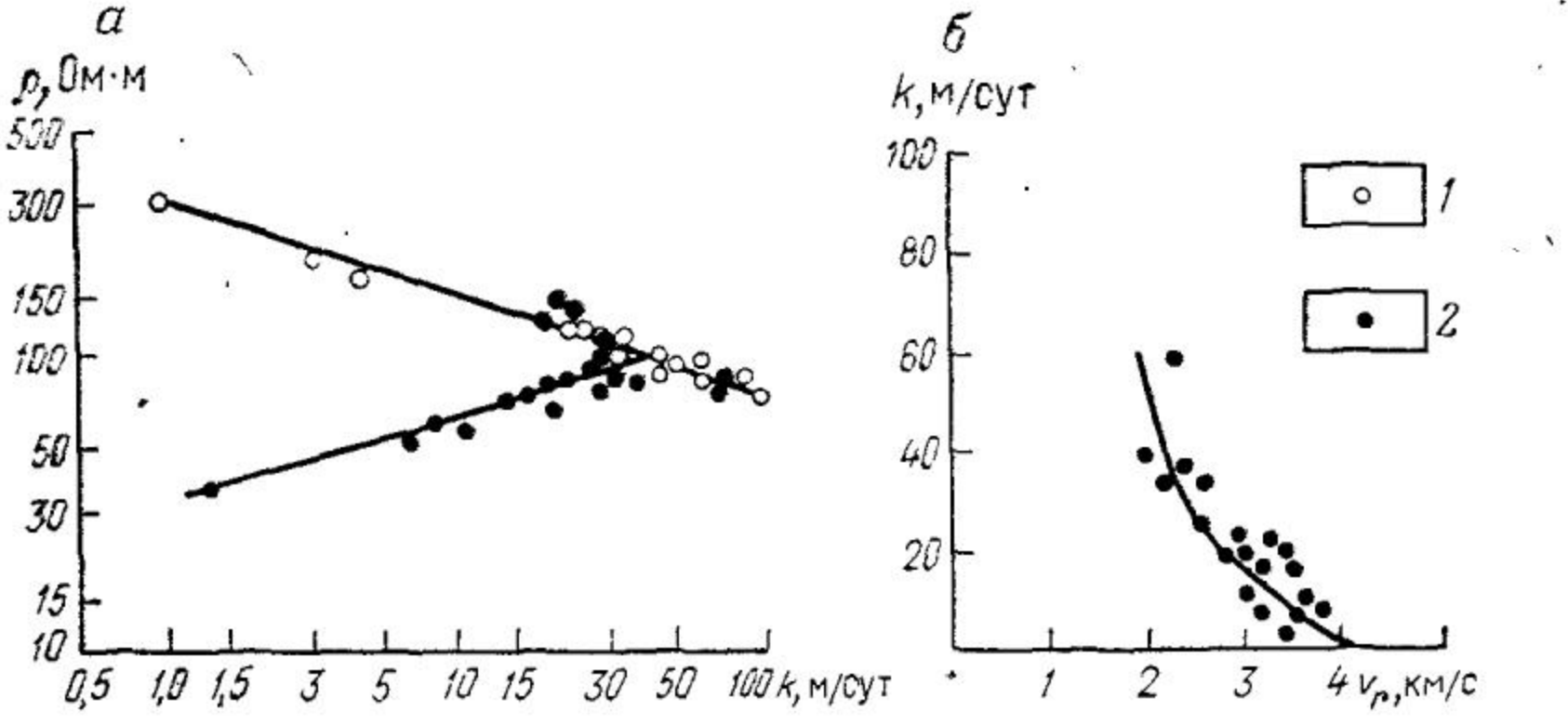


Рис. 52. Графики зависимости удельного электрического сопротивления *(а)* и граничной скорости преломленной волны *(б)* от коэффициента фильтрации пород для касимовского *(1)* и клязьминско-ассельского *(2)* горизонтов

мыва и литологические «окна» выполнены здесь четвертичными и меловыми песчаными отложениями. Севернее долины р. Клязьмы юрские глины имеют практически сплошное распространение. Как показали опытно-фильтрационные работы, в долинах рек глинистая толща характеризуется повышенной проницаемостью.

Таблица 21. Геолого-гидрогеологические данные основных водоносных горизонтов и комплексов района Среднеклязьминского месторождения

Водоносные горизонты и комплексы и разделяющие их слои	Литологический состав	Мощность, м	Водопроводимость, $м^2$ с	Примечание
Мезозойский водоносный комплекс	Пески, глины	От нескольких метров до 50 м	—	—
Юрские разделяющие слои	Глины	12—15	—	—
Клязьминско-ассельский водоносный комплекс верхнего карбона	Известняки	От нескольких метров на юге до 110 м на севере	100—6000	—
Щелковские разделяющие слои	Глины	10—40		—
Касимовский водоносный горизонт верхнего карбона	Известияки	30—60	200—5000	К северу и северо-востоку минерализация подземных вод составляет 1,2—2,5 г/л
Кревякинские разделяющие слои	Мел-глинистая толща	10—15	—	—
Подольско-мячковский водоносный горизонт	Известняки	—	—	Подземные воды с повышенной минерализацией

Таким образом, гидрогеологические условия Среднеклязьминского месторождения для изучения основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод и подсчета запасов можно схематизировать в виде многослойной системы, состоящей из трех основных водоносных горизонтов и комплексов (мезо-кайнозойского, клязьминско-ассельского и касимовского) и двух разделяющих их слабопроницаемых толщ (юрских и щелковских глин). В таких условиях закономерности формирования эксплуатационных запасов подземных вод определяются главным образом характером взаимосвязи подземных

вод этажно расположенных водоносных горизонтов друг с другом, а также с поверхностными водами.

Анализ уровенных поверхностей выделенных водоносных горизонтов и комплексов показал, что в естественных условиях (до начала эксплуатации) на водоразделах наиболее высокое положение занимали уровни подземных вод мезо-кайнозойского комплекса, самое низкое — касимовского. В долине р. Клязьмы соотношение менялось на обратное: здесь уровни касимовского и клязьминско-ассельского горизонтов находились выше уровня первого от поверхности мезо-кайнозойского комплекса. Такое соотношение уровней указывает на наличие предпосылок для нисходящей фильтрации (питание подземных вод основных горизонтов карбона) в водораздельных частях месторождения и восходящей фильтрации (разгрузка подземных вод каменноугольных горизонтов в мезо-кайнозойский комплекс и речную сеть) в речных долинах. Благоприятным фактором для улучшения питания подземных вод различных водоносных горизонтов является наличие литологических «окон» в юрских глинистых отложениях, а также трещиноватых и опесчаненных разностей пород юрской и щелковской толщ. Подземные воды клязьминско-ассельского горизонта эксплуатируются с 1881 г., а касимовского — с 1935 г. Наиболее интенсивный рост водоотбора произошел в 50—60-е годы. В настоящее время в пределах месторождения расположены водозаборы городов Орехово-Зуева, Павловского Посада, Шатуры, Покрова и ряда других с общим отбором около 90 тыс. $м^3$/сут из клязьминско-ассельского и 130 тыс. $м^3$/сут из касимовского горизонтов.

В результате интенсивной эксплуатации подземных вод сформировались обширные депрессионные воронки в продуктивных клязьминско-ассельском и касимовском водоносных горизонтах с понижениями уровня в центре депрессии до 30—35 м. Влияние водоотбора распространилось почти на всю территорию изучаемого района, однако наибольшие изменения режима подземных вод отмечаются в юго-западной части района, где расположены крупные водозаборы. Анализ опыта эксплуатации показывает, что водозаборы работают в настоящее время при установившемся режиме (снижение уровней связано только с ростом водоотбора), что свидетельствует о компенсации роста водоотбора за счет усиления перетока подземных вод в продуктивные горизонты из питающего мезо-кайнозойского водоносного комплекса и поверхностных водотоков. Вместе с тем столь значительный водоотбор за многолетний период не оказал негативного влияния на окружающую среду. Лишь на отдельных участках в пределах литологических «окон» отмечено снижение уровня грунтовых вод на 1—2 м. Это позволило сделать выводы, что существенное увеличение водоотбора в пределах новых площадей в восточной части рассматриваемого района вполне возможно и не должно существенно повлиять на изменение природной обстановки.

МЕТОДИКА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Учитывая степень гидрогеологической изученности района и накопленный опыт эксплуатации подземных вод, дальнейшие исследования на Среднеклязьминском месторождении проводились на стадии детальной разведки. Выбранные для проведения дальнейших разведочных работ участки в долинах рек Клязьмы и Киржача (правый приток) характеризуются относительно слабонарушенным режимом подземных вод клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов.

Разведочные гидрогеологические работы были направлены на исследование многопластовой системы с целью определения источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, условий взаимосвязи продуктивных и питающих водоносных горизонтов через слабопроницаемые пласты, а также изменчивости фильтрационных свойств продуктивных горизонтов и разделяющих их слабопроницаемых пластов по площади. Кроме того, необходимо было оценить гидрогеологические параметры всех слоев исследуемой многопластовой системы, естественные ресурсы подземных вод, качество воды и другие вопросы, которые возникают при разведке месторождений в артезианских басссейнах платформенного типа, находящихся в сложных гидрогеологических условиях.

Гидрогеологические работы на месторождении выполнялись в два этапа. Первоначально (в 1977—1979 гг.) были проведены площадные гидрогеологические исследования. Они включили в себя решение следующих задач:

1. Картирование условий залегания и распространения водоносных горизонтов и слабопроницаемых разделяющих слоев, неоднородности их фильтрационных свойств, соотношения уровенных поверхностей водоносных горизонтов по площади района путем проведения площадных геофизических исследований методами ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, сейсморазведки, бурения и опробования гидрогеологических скважин и создания стационарной сети наблюдательных ярусных узлов из двух — четырех скважин, оборудованных раздельно на касимовский, клязьминско-ассельский и мезо-кайнозойский водоносные горизонты.

2. Оценка естественных ресурсов подземных вод гидрометрическими работами в бассейне среднего течения р. Клязьмы.

3. Анализ опыта эксплуатации подземных вод групповыми водозаборами, изучение условий формирования депрессионных воронок по площади и во времени по данным многолетних наблюдений за водоотбором и изменением уровенного режима подземных вод по площади района.

4. Изучение условий питания, разгрузки подземных вод и взаимосвязи водоносных горизонтов между собой, с грунтовыми и поверхностными водами путем проведения специального комплекса площадных гидрогеотермических, радиоизотопных и водно-гелиевых методов исследований.

5. Изучение физико-механических свойств глинистых пород юрского и щелковского возраста и их изменения при эксплуатационной нагрузке лабораторными методами.

6. Изучение условий и источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, определение фильтрационных и емкостных параметров водоносных горизонтов и разделяющих пластов многослойных водоносных систем путем проведения комплекса опытно-фильтрационных работ на специальных опытных кустах, размещенных на «ключевых» участках с характерными гидрогеологическими особенностями (долины рек второго и других порядков, водоразделы при наличии разделяющего пласта слабопроницаемых пород и в районах литологических «окон» и т. д.).

В результате проведения площадных гидрогеологических исследований были выбраны для постановки разведочных работ, кроме ранее разведанного участка Покров, перспективные участки Барсково и Костерево, которые в целом составляют Среднеклязьминское месторождение подземных вод.

Размещение по площади буровых и опытных скважин производилось по трем широтным и четырем меридиональным профилям, основные из которых расположены вдоль рек Клязьмы и Киржача. При этом плотность размещения сети скважин соответствовала картам масштаба 1 : 100 000. Скважины на меридиональных профилях располагались таким образом, чтобы были опробованы все характерные геоморфологические элементы (пойма, надпойменные террасы, склоны долины, водоразделы).

На втором этапе (1979—1981 гг.) на участках Барсково и Костерево были выполнены детальные гидрогеологические работы применительно к обоснованию выбранных схем проектируемых линейных водозаборов вдоль рек Клязьмы и Киржач. Детальные исследования включали в себя традиционный комплекс буровых, опытно-фильтрационных, геофизических и других видов работ. Кроме того, в этот период был сооружен и обурудован специальный опытно-методический полигон «Петушки» с целью более детального изучения условий и источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод в долине р. Клязьмы, определения фильтрационных и емкостных параметров водоносных горизонтов и слабопроницаемых глинистых пластов, выяснения характера и фильтрационных потоков в многопластовой водоносной системе в процессе интенсивной эксплуатации.

На опытном полигоне «Петушки» выполнен большой комплекс опытно-фильтрационных и специальных работ (рис. 53). Опытные кустовые откачки проведены в различных режимах (раздельно из каждого водоносного горизонта и одновременно из обоих горизонтов) с наблюдениями за изменением уровней и пластовых давлений во всех вскрытых водоносных горизонтах и разделяющих их глинистых слоях. Для повышения каче-

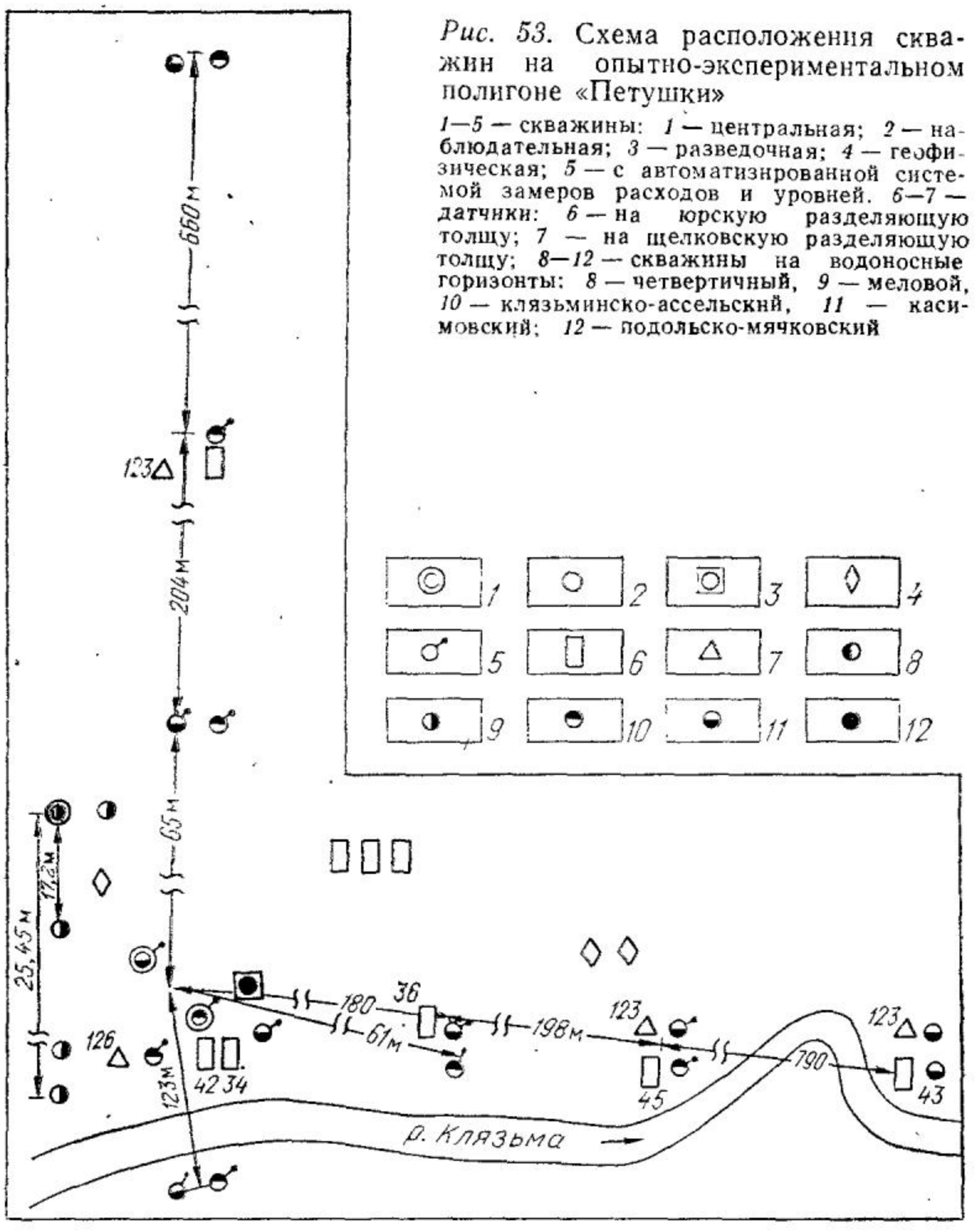


Рис. 53. Схема расположения скважин на опытно-экспериментальном полигоне «Петушки»

1—5 — скважины: *1* — центральная; *2* — наблюдательная; *3* — разведочная; *4* — геофизическая; *5* — с автоматизированной системой замеров расходов и уровней. *6—7* — датчики: *6* — на юрскую разделяющую толщу; *7* — на щелковскую разделяющую толщу; *8—12* — скважины на водоносные горизонты: *8* — четвертичный, *9* — меловой, *10* — клязьминско-ассельский, *11* — касимовский; *12* — подольско-мячковский

ства и информативности работ замеры уровней подземных вод и дебитов скважин осуществлялись с помощью автоматизированной системы КПВ-4 конструкции ВСЕГИНГЕО. Применение этой системы дало возможность вести непрерывный и оперативный контроль за динамикой изменения уровней воды. Наблюдения за изменением давления в слабопроницаемых глинистых пластах проводились измерителями пластового давления (ИПД) конструкции ВСЕГИНГЕО, установленными непосредственно в разделяющих глинистых толщах (рис. 54). Кроме того, процессы перетекания подземных вод через слабопроницаемые глинистые слои фиксировались детальными электроразведочными работами (по изменению электрического поля) и водно-гелиевыми опробованиями подземных вод (по изменению содержания в воде гелия).

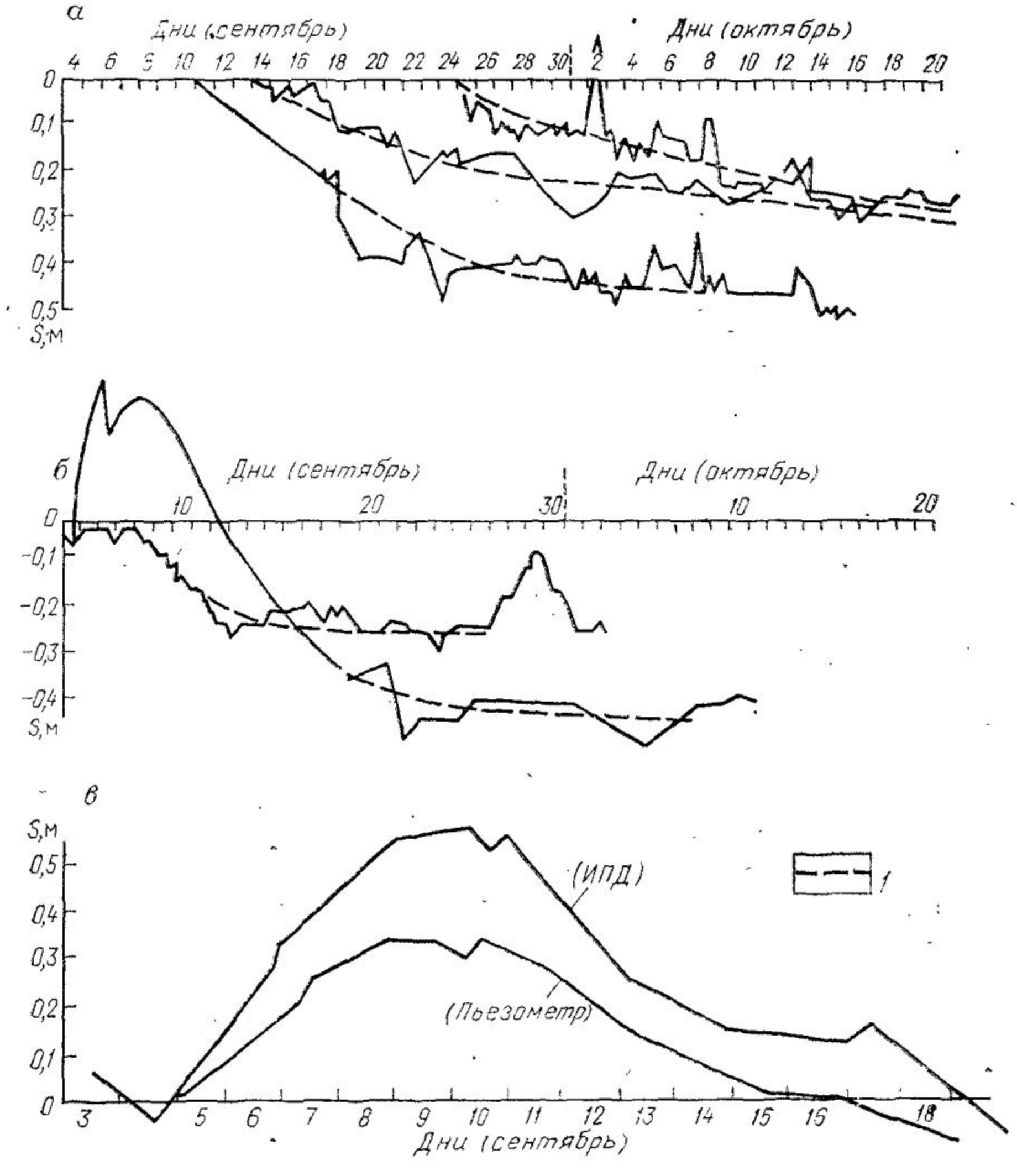


Рис. 54. Хронологические графики снижения уровней при одновременной откачке из клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов в юрских глинах (*а*), в щелковских глинах (*б*) и в меловом водоносном горизонте (*в*).
Пунктиром показана осредняющая линия

Выполненный комплекс площадных и специальных опытных исследований на характерных участках позволил обосновать геофильтрационную модель рассматриваемого района в масштабе 1 : 100 000, которая была уточнена впоследствии при решении серии обратных задач на АВМ и ЭЦВМ ЕС-1022.

Рассмотрим несколько подробнее методику и результаты основных и специальных видов площадных работ.

Гидрологические работы выполнялись с целью региональ-

ной оценки естественных ресурсов подземных вод. С этой целью были проведены исследования в долине р. Клязьмы. В 1977 г. была проведена меженная гидрометрическая съемка в бассейне. На 31-м створе реки и ее притоках было проведено 118 единовременных замеров расхода воды. При анализе материалов были использованы данные гидрометрических работ Государственного гидрологического института (1968—1972 гг.), когда было измерено 162 расхода воды на 70 створах в пределах изучаемой территории. Данные гидрометрических съемок были приведены к среднегодовым расходам подземного стока 50 и 95 %-ной обеспеченности. В соответствии с данными гидрометрических работ естественные ресурсы подземных вод района при площади водосбора 10 000 км², отнесенные ко всей многопластовой водоносной системе, составили: при 50 %-ной обеспеченности стока — 1,1 млн. м³/сут, при 95 %-ной обеспеченности — 0,75 млн. м³/сут.

На участках были проведены площадные геофизические исследования с целью изучения фильтрационных свойств продуктивных водоносных горизонтов и верхнеюрской слабопроницаемой глинистой толщи, литологическое расчленение мезокайнозойской песчано-глинистой толщи, морфологии кровли каменноугольных отложений и уровня грунтовых вод, а также детальное изучение трещиноватости и закарстованности карбонатных пород на участках опытных гидрогеологических кустов. В соответствии с целевым назначением исследований был использован следующий комплекс геофизических методов: ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, электропрофилирование и сейсморазведка методом преломленных волн [21]. На первом этапе работы были выполнены параметрические измерения ВЭЗ и сейсморазведкой у буровых скважин, а также отработаны два рекогносцировочных профиля меридионального и широтного направлений, характеризующиеся наибольшей изменчивостью гидрогеологических условий. На втором этапе были выполнены площадные работы по сети меридиональных и широтных профилей с шагом зондирований 4—6 км.

Литологическое расчленение разреза производилось по данным ВЭЗ (определение глубин залегания отдельных геоэлектрических границ), а также методом гамма-каротажа с регистрацией кривой естественной радиоактивности. Выделение водообильных зон, определение их мощности и оценка минерализации пластовой воды проводились методом электролитического каротажа. Расходометрия использовалась для изучения зон активного водообмена и характера послойного изменения дебитов в пределах этих зон. Оценка каверзности пород по стволу скважин производилась с записью кавернограмм по всему стволу скважины.

Материалы геофизических исследований с учетом результатов других видов работ использованы при построении геолого-гидрогеологических разрезов, гидрогеологических карт и в ко-

нечном счете обосновании геофильтрационной схемы месторождения. В целом они позволили существенно увеличить «плотность информации» по площади месторождения за счет сгущения сети точек опробования.

На месторождении был выполнен большой объем буровых и опытно-фильтрационных работ. По целевому назначению все пробуренные скважины подразделяются на наблюдательные, разведочные и опытные. Разведочные скважины расположены как по площади района, так и в створах применительно к выбранным схемам будущих водозаборов. Опытные скважины были пройдены для проведения кустовых откачек в специально оборудованных кустах. Наблюдательные скважины имели различное назначение: двух-четырехярусные узлы режимной сети по площади района (на водоносные горизонты и разделяющие слои); скважины на опытных кустах на продуктивный и смежные водоносные горизонты; скважины для наблюдения за уровнями в слабопроницаемых пластах с помощью измерителей пластового давления (ИПД).

Сеть скважин для наблюдений за режимом подземных вод расположена относительно равномерно по площади района с учетом ранее существовавших наблюдательных скважин и расположения действующих групповых водозаборов подземных вод. Режимная сеть оборудовалась, как правило, на три водоносных горизонта: касимовский, клязьминско-ассельский и мезокайнозойский. Во всех наблюдательных скважинах выполнен комплекс опытно-фильтрационных работ и проведены каротажные геофизические исследования. При бурении некоторых скважин были отобраны монолиты глинистых пород для изучения свойств разделяющих слоев лабораторными методами. Одиночные разведочные скважины на касимовский и клязьминско-ассельский водоносные горизонты задавались таким образом, чтобы охарактеризовать эти горизонты на площадях, где отсутствовали данные опробования. Ряд параметрических скважин был пройден для уточнения данных площадных геофизических работ.

Опытные кусты скважин на участках детального изучения создавались с целью определения фильтрационных и емкостных свойств продуктивных водоносных горизонтов, условий их взаимосвязи, оценки параметров перетекания через слабопроницаемые глинистые пласты. Опытные кусты были пройдены в долинах рек Клязьмы, Пекши и Киржач, на водоразделах и на площади размыва верхнеюрских глин. В каждом опытном кусте одна наиболее глубокая скважина должна быть пройдена с отбором керна. Как правило, опытные кусты однолучевые, с тремя наблюдательными скважинами. Данные бурения и опробования скважин, в первую очередь кустовые откачки, являлись опорными для построения серии гидрогеологических разрезов и карт параметров водоносных горизонтов и разделяющих их слабопроницаемых пластов.

Выполненный на месторождении комплекс работ на участках детальной разведки позволил получить достоверные данные для обоснования запасов промышленных категорий А и В.

Режим подземных вод изучался в процессе разведки по специальной сети ярусных узлов наблюдательных скважин, были использованы также данные по режиму подземных вод на территории всего района. Это позволило воспользоваться циклом режимных наблюдений общей продолжительностью до 24 лет. По полученным данным были изучены соотношение уровней подземных вод всех выделенных водоносных горизонтов по площади района, развитие и распространение депрессионных воронок в процессе эксплуатации групповыми водозаборами и их изменения во времени. Кроме того, проводились наблюдения за уровнями поверхностных вод, что позволило изучить связь поверхностных и подземных вод и количественно оценить параметры этой взаимосвязи. Данные многолетних наблюдений за режимом подземных вод в пределах действующих водозаборов позволили установить, что увеличение понижения уровня во времени связано только с ростом водоотбора. Поскольку на графиках $S/Q=f(t)$ не отмечается тенденция к закономерному возрастанию величины S/Q во времени, был сделан вывод, что водоотбор полностью компенсируется источниками восполнения запасов (естественными ресурсами и поверхностными водами) и при стабилизации водоотбора режим подземных вод приобретает установившийся характер.

Гидрогеотермические исследования проводились с целью выявления положительных и отрицательных температурных аномалий для сравнительной качественной оценки условий питания подземных вод по площади месторождения и приближенной оценки скорости фильтрации через юрские и щелковские глинистые отложения. Исследования проводились в скважинах, пробуренных для наблюдений за режимом подземных вод. Они заключались в измерении температуры полупроводниковыми терморезисторами. Измерения проводились с шагом 3—5 м в интервале залегания глин 5—15 м в пределах водоносных горизонтов. Результаты гидрогеотермических исследований подтвердили наличие вертикальной нисходящей фильтрации через юрские глины на большей части площади месторождения и ее различную интенсивность в долинах рек и на водоразделах, а также в зависимости от глубины залегания и строения перекрывающей толщи. Выполненные расчеты скоростей и коэффициентов фильтрации показали, что в долинах р. Клязьмы и ее притоков эти параметры значительно выше (на один-два порядка), чем на водоразделах.

Перед водно-гелиевыми и радиоизотопными исследованиями ставилась задача изучения условий питания подземных вод клязьминско-ассельского и касимовского горизонтов, в том числе — взаимосвязи между клязьминско-ассельским и вышеи нижерасположенными водоносными горизонтами.

Водно-гелиевые исследования заключались в отборе проб воды главным образом из эксплуатационных, а также из наблюдательных скважин и в определении содержания гелия прибором ИНГЕМ-1. При этом определялась только относительная концентрация гелия в подземных водах, т. е. отклонение концентрации гелия в анализируемой воде от его концентрации в воде, равновесной с атмосферным воздухом по газосодержанию.

Содержание гелия определялось в основном в подземных водах клязьминско-ассельского и касимовского горизонтов, кроме того, в небольшом объеме было проведено опробование подольско-мячковского, четвертичного и мелового водоносных горизонтов.

В разрезе каменноугольных отложений наблюдается закономерное увеличение содержания гелия с глубиной. Так, в южной части месторождения содержание гелия в подземных водах клязьминско-ассельского горизонта не превышает $10 \cdot 10^{-5}$ мл/л, в водах касимовского горизонта составляет $30—40 \cdot 10^{-5}$ мл/л, а в водах подольско-мячковского горизонта превышает $100 \cdot 10^{-5}$ мл/л.

Анализируя изменение содержания гелия в клязьминско-ассельском горизонте можно сделать вывод, что минимальные значения гелия (менее $10 \cdot 10^{-5}$ мл/л) наблюдаются в северо-западной, западной и южной частях рассматриваемой территории. Низкое содержание гелия в северо-восточной части связано с достаточно благоприятными условиями перетока из вышележащих горизонтов, что объясняется наличием песчаных линз юрских глин. В западной части понижение содержания объясняется влиянием интенсивной эксплуатации подземных вод. Резкое повышение содержания гелия отмечается в междуречье рек Липны и Вольги, что связано, очевидно, с подтоком глубинных вод по тектоническим нарушениям.

На графике (см. рис. 51) четко прослеживается закономерность изменения содержания гелия в водах клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов при их погружении с юга на север.

Радиоуглеродные исследования заключались в определении содержания в подземных водах радиоуглерода C^{14}. Повышенное содержание радиоуглерода при прочих равных условиях может свидетельствовать об улучшении условий питания подземных вод поверхностными и атмосферными водами.

В целом результаты определения в подземных водах радиоуглерода полностью корреспондируют с данными водно-гелиевых исследований и свидетельствуют об интенсификации процессов перетекания вод из вышележащих водоносных горизонтов при эксплуатации водозаборов.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОПЫТНОМ КУСТЕ-ПОЛИГОНЕ «ПЕТУШКИ»

Проведенные площадные исследования позволили качественно оценить условия взаимосвязи различных водоносных горизонтов на площади месторождения, выявить участки возможной нисходящей и восходящей фильтрации через слабопроницаемые отложения и ориентировочно оценить их коэффициенты фильтрации. Однако этих данных было недостаточно для разработки фильтрационной схемы месторождения, так как при площадных исследованиях сложные процессы перетекания изучались методами, количественные оценки по которым не всегда достаточно точны. В связи с этим была необходима постановка на месторождении специальных гидродинамических исследований с целью детального изучения процессов перетекания. Такие исследования заключались в создании опытных кустов для проведения детальных опытно-фильтрационных работ, в которых опытные и наблюдательные скважины были оборудованы как на основные, так и на смежные водоносные горизонты. Для изучения реакции глинистых разделяющих пластов на откачки из водоносных горизонтов была использована сеть наблюдательных скважин, оборудованных, как и в предыдущем случае, специальными измерителями пластового давления (ИПД) конструкции ВСЕГИНГЕО.

Всего было опробовано три опытно-экспериментальных куста: «Костерево», «Покров» и «Петушки». Наиболее детальные опытно-фильтрационные исследования выполнялись на кусте «Петушки», расположенном в долине р. Клязьмы в восточной части месторождения, где существуют благоприятные условия для строительства новых водозаборных сооружений. Для создания интенсивного водозабора в трехлучевом кусте было оборудовано по две опытно-центральные скважины на клязьминско-ассельский и касимовский водоносные горизонты. В каждом луче наблюдательные скважины пробуривались попарно как на клязьминско-ассельский, так и на касимовский горизонт. В центре куста были пробурены наблюдательные скважины на четвертичный, меловой, клязьминско-ассельский, касимовский и подольско-мячковский горизонты. Измерителями пластового давления были оборудованы четыре скважины на щелковские глины и девять — на юрские. ИПД располагали таким образом, чтобы охарактеризовать изменения пластового давления в процессе опытов по разрезу глинистых толщ и по площади депрессионной воронки. Для увеличения точности измерения уровня, расходов и частоты замеров вся наблюдательная сеть в радиусе 200 м была оборудована уровнемерами с автоматизированной регистрацией уровней и расходов. В процессе откачек наблюдения проводились также по всем имеющимся наблюдательным и разведочным скважинам в радиусе до 15—20 км. Опытные откачки проводились как из клязьмин-

ско-ассельского и касимовского горизонтов раздельно, так и из обоих горизонтов совместно. Водоотбор из клязьминско-ассельского горизонта в среднем составлял 12 тыс. м³/сут, из касимовского — 6 тыс. м³/сут при понижениях уровня соответственно 6 и 2 м. Продолжительность каждого опыта составляла 20—25 сут. При откачках изменения уровня были зафиксированы во всех водоносных горизонтах и глинистых разделяющих толщах (рис. 55).

Опробование водоносных горизонтов проводилось на фоне существенно изменяющегося уровня поверхностных вод в р. Клязьме и связанных с этим изменений уровней в четвертичном и меловом водоносных горизонтах.

При одновременном водоотборе (при групповой откачке) из клязьминско-ассельского и касимовского горизонтов наблюдается увеличение понижения уровня в клязьминско-ассельском по сравнению с откачкой только из одного этого горизонта. Это подтверждает взаимосвязь водоносных горизонтов через слабопроницаемые щелковские отложения в пределах опробованной водонасыщенной слоистой системы.

Наличие взаимосвязи водоносных горизонтов подтверждается также данными об изменениях уровня (давления) в слабопроницаемых юрских и щелковских глинах. По данным об из-

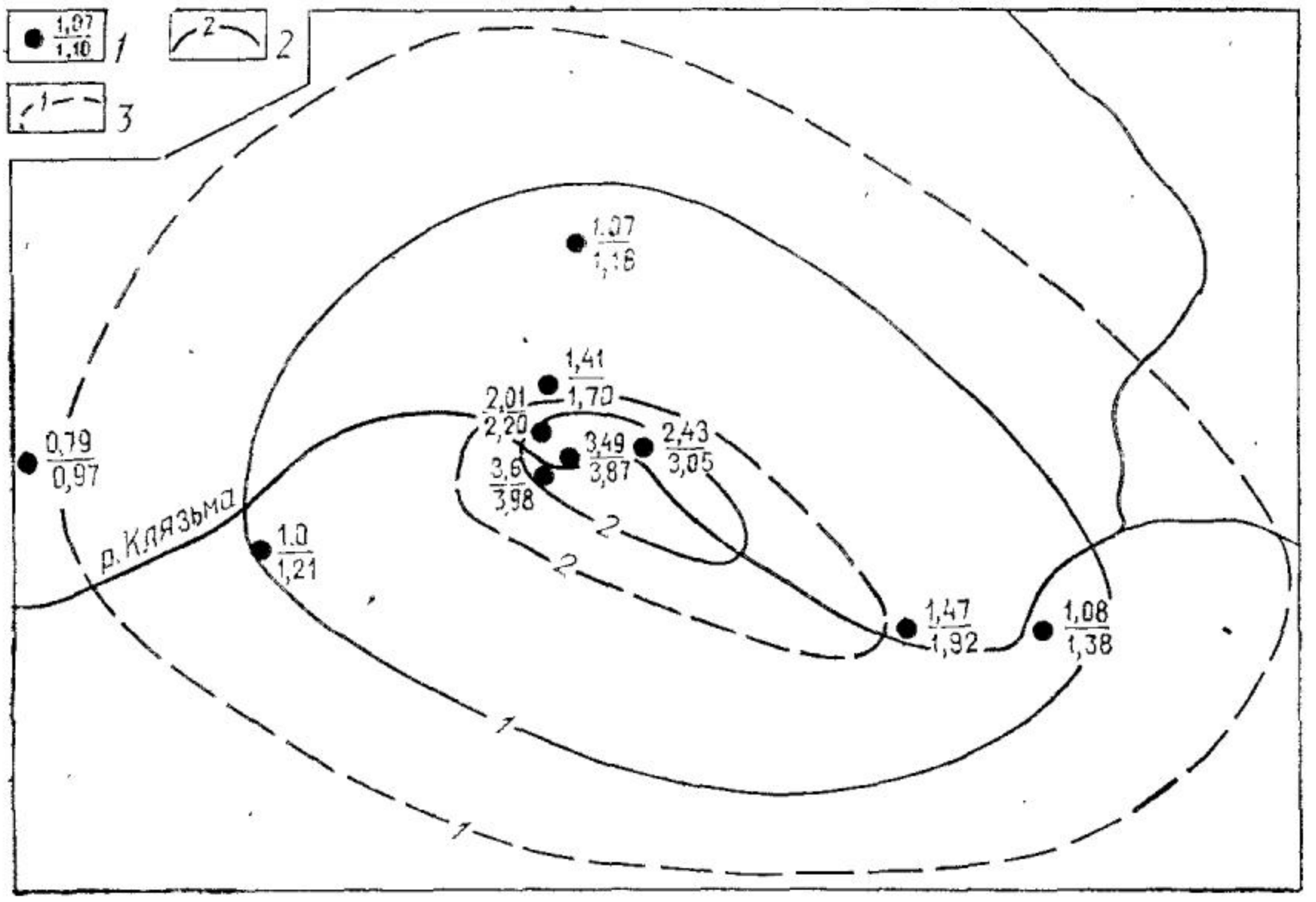


Рис. 55. Схема понижений уровня в клязьминско-ассельском водоносном горизонте на 30-е сутки после начала опробования в разных режимах.

1 — наблюдательная скважина, в числителе — понижение уровня в метрах при откачке из клязьминско-ассельского горизонта, в знаменателе, то же, при откачке из клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов; *2—3* — линии понижения уровней при откачке; *2* — из клязьминско-ассельского, *3* — из клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов (цифрой дано понижение уровня в метрах)

менении уровней в глинах также определяется их коэффициент пьезопроводности.

Обработка результатов работ на опытном полигоне позволила сделать следующие выводы.

1. Вся опробованная многопластовая водоносная толща должна рассматриваться как единая гидравлическая система. Водоносные горизонты не являются изолированными друг от друга.

2. Опытно-фильтрационные работы позволили определить не только расчетные параметры водоносных горизонтов, но и коэффициенты фильтрации и упругой водоотдачи разделяющих глинистых отложений. Коэффициенты фильтрации юрских глин были получены равными от $3 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ м/сут, щелковских глин — от $3 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут, упругая водоотдача юрских глин — $2 \cdot 10^{-2}$, щелковских глин — порядка 10^{-3}. Коэффициент фильтрации юрских глин в целом выше, чем щелковских, однако их фильтрационные сопротивления в связи с большей мощностью юрских отложений соизмеримы. Упругая водоотдача юрских глин на порядок превышает водоотдачу щелковских, а щелковских глин на порядок превышает водоотдачу продуктивных водоносных горизонтов. Это свидетельствует о необходимости учета в прогнозных расчетах оценки запасов подземных вод упругоемкости глинистых разделяющих отложений.

3. Изучение режима содержания гелия в подземных водах показало, что его содержание, как и следовало ожидать, зависит от продолжительности откачки и системы водоотбора (опробуется ли один из водоносных горизонтов или оба горизонта совместно).

Эти изменения полностью определяются интенсивностью перетекания из вышележащих горизонтов при различных режимах откачки.

МЕТОДИКА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Результаты площадных и специальных исследований на опытном полигоне позволили обосновать фильтрационную схему месторождения, в том числе построить карты водопроводимости водоносных горизонтов (рис. 56) и коэффициентов фильтрации разделяющих глинистых отложений.

При построении карты и выделении границ зоны с различными значениями водопроводимости были учтены следующие факторы, влияющие на формирование фильтрационных свойств трещинно-карстовых пород в рассматриваемом районе.

1. Морфология рельефа водовмещающих пород, определяющая увеличение их трещиноватости и закарстованности в наибольшей степени в долинах рек первого порядка (прежде всего в долине р. Клязьмы) по сравнению с долинами притоков малых рек и водоразделами.

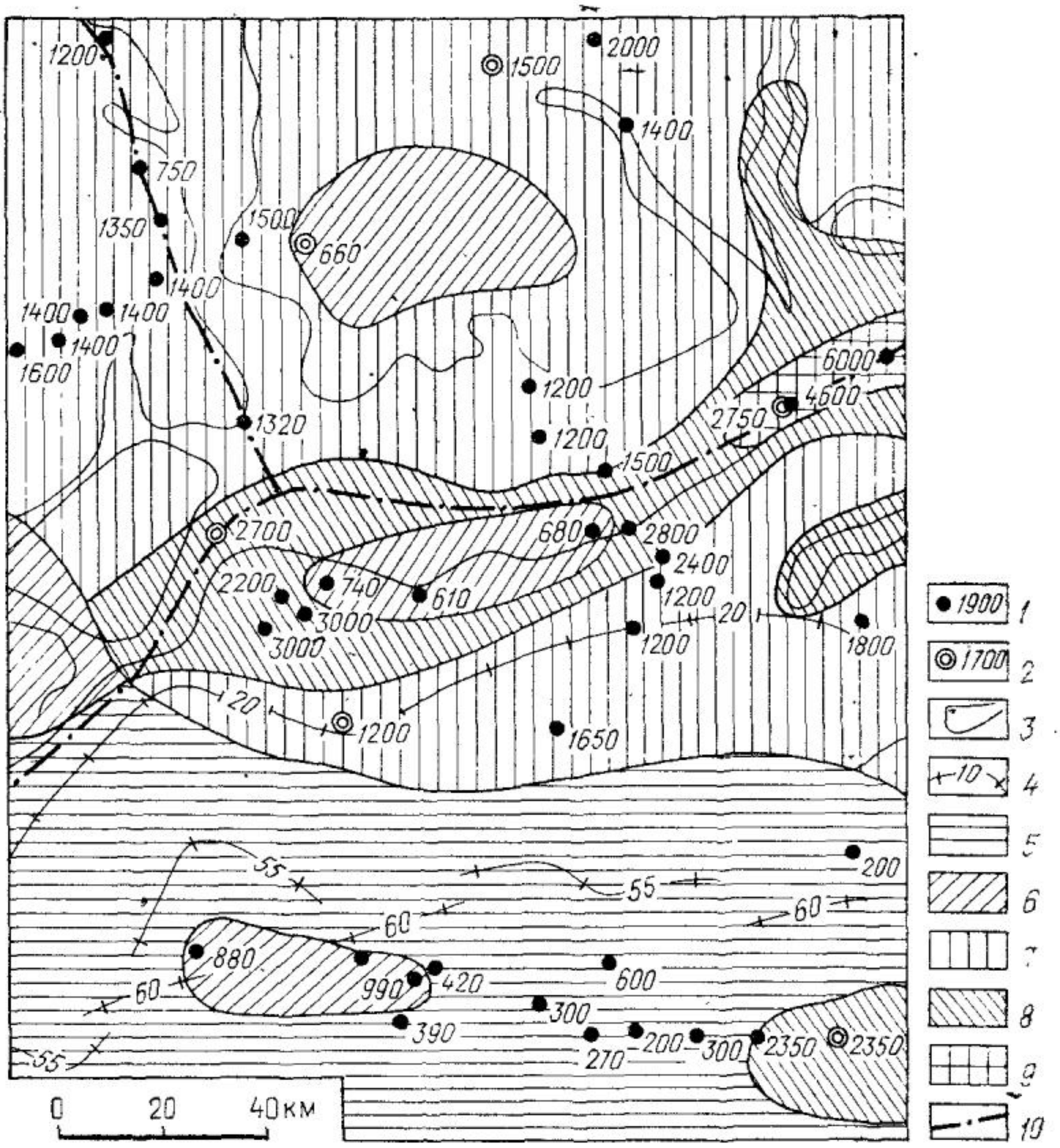


Рис. 56. Фрагмент карты водопроводимости клязьминско-ассельского горизонта.

1 — точка ВЭЗ, цифрами даны значения водопроводимости (в м²/сут) по геофизическим данным; *2* — гидрогеологическая скважина, цифрами даны значения водопроводимости (в м²/сут); *3* — современные речные долины; *4* — границы зоны развития флексурного перегиба в каменноугольных отложениях (цифрами обозначены абсолютные отметки подошвы щелковской толщи). *5—9* — зоны с различной водопроводимостью пород: *5* — до 500; *6* — 500—1000; *7* — 1000—2000; *8* — 2000—3000; *9* — более 3000 м²/сут. *10* — линия проектного водозабора

2. Глубина залегания водоносного горизонта. Отмечена общая тенденция к уменьшению фильтрационных свойств водоносных пород с юга на север в направлении погружения водоносных пластов.

3. Тектонико-структурные особенности района (наличие флексур, поднятий и депрессий). В зонах тектонических нарушений может отмечаться усиление трещиноватости пород.

4. Характер развития депрессионных воронок при эксплуатации подземных вод, обычно вытянутых по долинам рек по зонам с повышенными фильтрационными свойствами.

5. Наличие в разрезе участков размыва в юрских глинах.

6. Наличие погребенных доюрских палеодолин.

При построении карт вертикальных коэффициентов фильтрации глинистых разделяющих отложений k_0 учитывались данные специальных опытно-фильтрационных работ, закономерности, выявленные при проведении электроразведочных, геотемпературных, водно-гелиевых и радиоизотопных исследований, а также литологический состав отложений и результаты определений их физико-механических свойств. Дифференциация по площади базировалась на данных о величине кажущегося удельного электрического сопротивления $\rho_к$, изменяющегося от 5 до 80 Ом · м. Величина k_0 меняется от 10^{-3} до 10^{-6} м/сут.

Учитывая сложные условия формирования подземных вод и сложные процессы взаимодействия между водоносными горизонтами, переоценка эксплуатационных запасов для всего района в целом и оценка запасов собственно Среднеклязьминского месторождения были выполнены методом математического моделирования. Схема модели в целом соответствовала природным гидрогеологическим условиям района. Три водоносных горизонта (мезо-кайнозойский, клязьминско-ассельский и касимовский) рассматривались на модели как единая водопроводящая и емкостная среда; два слабопроницаемых пласта (юрский и щелковский) рассматривались только как водопроводящие. Питание рек учитывалось на модели с граничными условиями III рода с коэффициентом перетекания $k_0/m_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ и $S_р = 0$. Взаимодействие мезо-кайнозойского и клязьминско-ассельского водоносных горизонтов определялось фильтрационной проводимостью их разделяющих юрских глин, а клязьминско-ассельского и касимовского — разделяющих щелковских глин. Глины на модели были схематизированы как безъемкостная среда, поскольку каждый слабопроницаемый пласт моделировался как однослойный. Поскольку задача решалась в понижениях уровня (при заданном расходе водозабора), внешние границы модели, совпадающие с линиями тока, были заданы граничным условием II рода $Q = \text{const}$.

Основные гидрогеологические параметры водоносных горизонтов, а также разделяющих слоев, принятые на модели, приведены в табл. 22.

При решении прогнозной задачи на модели не была учтена инверсия разгрузки клязьминско-ассельского и касимовского водоносных горизонтов на юге месторождения в области распространения литологических «окон» как не обоснованная натурными данными, что дает определенный запас в выполненных расчетах.

В результате решения на модели прогнозной задачи было показано, что в конце прогнозного срока эксплуатации ($t_{пр} = 25$ лет) практически весь водоотбор подземных вод на площади месторождения будет формироваться за счет перетока подземных вод сверху, который, в свою очередь, определяется сработкой емкостных запасов мезо-кайнозойского комплекса (27 %), притоком и перехватом естественных ресурсов из рек

(73 %). На основании решения эпигнозной задачи установлено, что в настоящий период на действующих водозаборах доля сработки емкостных запасов мезо-кайнозойского водоносного комплекса меньше и составляет всего 18 %, перехват естественных ресурсов и приток из рек составляет 82 %. Таким образом, интенсификация водоотбора с учетом действующих и будущих водозаборов приводит к более существенной сработке емкостных запасов грунтовых вод, что определяется более обширным распространением депрессионных воронок. Приток из рек формируется в основном за счет инфильтрации поверхностных вод р. Клязьмы (63 %), из остальных рек приток составляет от 14

Таблица 22. Основные параметры водоносных пород и разделяющих слоев, принятые при моделировании для оценки эксплуатационных запасов подземных вод

Схематизированная гидрогеологическая единица	Водопроводимость, $м^2$/сут	Водоотдача	Коэффициент перетекания
Мезо-кайнозойский водоносный комплекс	10—150	0,1	
Клязьминско-ассельский водоносный горизонт	250—4000	$3{,}2 \cdot 10^{-3}$ $2{,}0 \cdot 10^{-4}$	
Касимовский водоносный горизонт	200—5000	$5{,}2 \cdot 10^{-4}$ $2{,}0 \cdot 10^{-4}$	
Юрский слабопроницаемый пласт	—	$9{,}0 \cdot 10^{-3}$	$1{,}7 \cdot 10^{-7}$ $1 \cdot 10^{-2}$
Щелковский слабопроницаемый пласт	—	$9{,}6 \cdot 10^{-4}$	$5{,}0 \cdot 10^{-7}$ $1{,}5 \cdot 10^{-4}$

до 2 % от общего притока из рек. Очевидно, в натурных условиях изъятие речного стока будет значительно меньше, так как на модели учтены не все источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод из-за недостаточной изученности месторождений. Емкостные запасы мезо-кайнозойского комплекса, очевидно, будут играть более существенную роль в формировании эксплуатационных запасов, поскольку на модели была задана минимальная величина его гравитационной водоотдачи (10 %). Тем не менее даже при таких наиболее жестких условиях не произойдет осушения мезо-кайнозойского комплекса. Максимальные понижения уровня наблюдаются в восточной части долины р. Клязьмы в зоне сосредоточенного

водоотбора (до 14 м при мощности 20 м и в пределах литологических «окон», до 10 м при мощности 15 м). В зоне минимальных мощностей, порядка 5 м, в юго-западной части месторождения, снижение уровней в мезо-кайнозойском комплексе не превышает 4 м.

Снижение уровней в клязьминско-ассельском и касимовском водоносных горизонтах, как показали результаты моделирования, не будет превышать допустимых значений, т. е. $S_{расч} \leqslant S_{доп}$, что определяет обеспеченность разведанных запасов.

Таким образом, в результате прогнозного моделирования установлены оптимальное распределение эксплуатационного водоотбора и его общая величина. Категоризация эксплуатационных запасов проведена с учетом имеющегося фактического материала. Общая величина эксплуатационных запасов подземных вод в пределах оцениваемой площади всего месторождения с учетом действующих водозаборов составила более 1 млн. м³/сут с примерно равным ее распределением между обоими эксплуатационными водоносными горизонтами. В эту величину входят и эксплуатационные запасы действующих водозаборов с учетом возможности увеличения или сокращения действующего водоотбора. Собственно по Среднеклязьминскому месторождению эксплуатационные запасы составили около 0,5 млн. м³/сут. Проектные водоотборы состоят из линейных рядов узлов скважин в долине рек Клязьмы (длина около 50 км) и Киржача (длина около 15 км).

В каждом узле, как правило, проектируются спаренные скважины по одной на каждый водоносный горизонт с производительностью от 2 до 7 тыс. м³/сут каждая, в зависимости от величины водопроводимости и допустимого понижения уровня. В схеме водозаборов расстояние между водозаборными узлами 1 км.

Глава 20

ОСОБЕННОСТИ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ СУРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕСТОРОЖДЕНИИ

В настоящей главе изложены некоторые особенности методики разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод Сурского месторождения, которое по природным условиям относится к четвертому типу (см. табл. 4). Особенности эти состоят в том, что на небольшой сравнительно площади артезианского бассейна необходимо было произвести разведку и оценить запасы на четырех водозаборных участках, находящихся во

взаимодействии друг с другом (новые разведочные участки и действующие водозаборы). По степени сложности гидрогеологических условий для целей разведки, месторождение относится ко второй группе (сложные гидрогеохимические условия).

Месторождение подземных вод расположено в пределах Сурско-Хоперского артезианского бассейна. В гидрографическом отношении территория расположена в бассейне малой реки, представляющем собой слабо расчлененную равнину.

В геологическом строении района принимают участие карбонатные породы и глинистые образования средне-верхнекаменноугольного возраста, перекрытые песчано-глинистой толщей мезокайнозойских пород юрского, мелового и третичного возраста, а также четвертичными покровными отложениями. Среднекаменноугольные отложения повсеместно представлены известняками и доломитами башкирского яруса мощностью до 35 м и четырьмя горизонтами московского яруса: верейским (глины с прослоями песчаников и мергелей общей мощностью 15—26 м), каширским, подольским и московским (карбонатные породы — известняки и доломиты суммарной мощностью около 230 м). Верхнекаменноугольные отложения (гжельский ярус) согласно залегают на отложениях московского яруса и представлены в основном доломитами, реже известняками. Прослой плотных глин и мергелей мощностью 2—4 м, имеющий региональное распространение и залегающий в основании гжельского яруса, разделяет средне- и верхнекаменноугольные отложения. Мощность пород гжельского яруса изменяется от 25—30 до 70 м. На юге и западе района этот горизонт выклинивается.

В гидрогеологическом отношении район месторождения изучен хорошо: по району имеется гидрогеологическая карта масштаба 1 : 200 000; в районе пробурено и опробовано большое количество картировочных, разведочных и эксплуатационных скважин.

Наиболее водообильным и широко распространенным является водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватым и закарстованным породам каменноугольного возраста. Этот продуктивный горизонт и явился объектом детальной разведки и оценки эксплуатации запасов подземных вод.

В толще мезокайнозоя условно выделяют до 12 мелких по мощности водоносных горизонтов, приуроченных к песчаным прослоям. Местами горизонты имеют между собой гидравлическую связь.

В юго-восточном направлении водоносные карбонатные породы постепенно погружаются и отмечается повышенная минерализация подземных вод (> 1 г/л). Нижняя часть водовмещающих пород также содержит воды повышенной минерализации (> 1 г/л). Мощность зоны пресных вод на месторождении колеблется от нескольких до 275 м.

Сложные гидрогеохимические условия месторождения предопределили особенности его разведки — специальное изучение

с помощью буровых скважин условий распространения подземных вод повышенной минерализации и изучение опытным путем возможного изменения качества пресных подземных вод.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СТАДИЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

В соответствии с заявленной потребностью в воде для городского водоснабжения разведочные работы на месторождении проводились в три этапа. На первом этапе были изучены три ближайших к городу разведочных участка и намечены новые перспективные участки. На втором этапе в связи с ростом водоснабжения разведочные работы были проведены еще на двух участках. Третий этап включал режимные наблюдения за опытом эксплуатации построенных на разведочном участке водозаборных сооружений (этап эксплуатационной разведки).

Первый разведочный участок расположен к северо-востоку от города и имеет протяженность 3,8 км. Участок вытянут в северо-восточном направлении по правобережью р. Восточная (рис. 57).

Водоносные известняки и доломиты среднего-верхнего карбона залегают здесь на глубине до 90 м. Отложения верхнего карбона отделяются от водоносных пород среднего карбона глинистым прослоем мощностью в несколько метров. К юго-востоку от участка отмечается резкое погружение водоносных пород по субмеридиональной флексуре. Несколько восточнее этой флексуры проходит граница раздела пресных и минерализованных вод.

Мощность зоны пресных вод, приуроченных к верхнекаменноугольным отложениям, составляет в среднем 50—55 м. Известняки среднего карбона содержат воды с минерализацией до 3 г/л.

Величина напора над кровлей водоносного горизонта составляет 63—66 м, глубина залегания пьезометрического уровня при разведке 11—14 м от дневной поверхности.

Учитывая достаточно хорошую гидрогеологическую изученность, разведочные работы проводились в одну стадию детальной разведки.

С учетом сложности гидрогеохимических условий месторождения подземных вод, а также опыта разведки и эксплуатации на площади участка было пробурено 38 гидрогеологических скважин различного назначения, в том числе: для выбранного линейного ряда скважин водозабора разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин — 13 с расстоянием между скважинами от 500 до 1100—1200 м; 14 наблюдательных и 11 скважин режимной сети, в том числе скважин, пробуренных включительно до зоны минерализованных подземных вод. Средняя глубина скважин составила 130—180 м. На участке был выполнен большой объем опытно-фильтрационных работ, кустовые

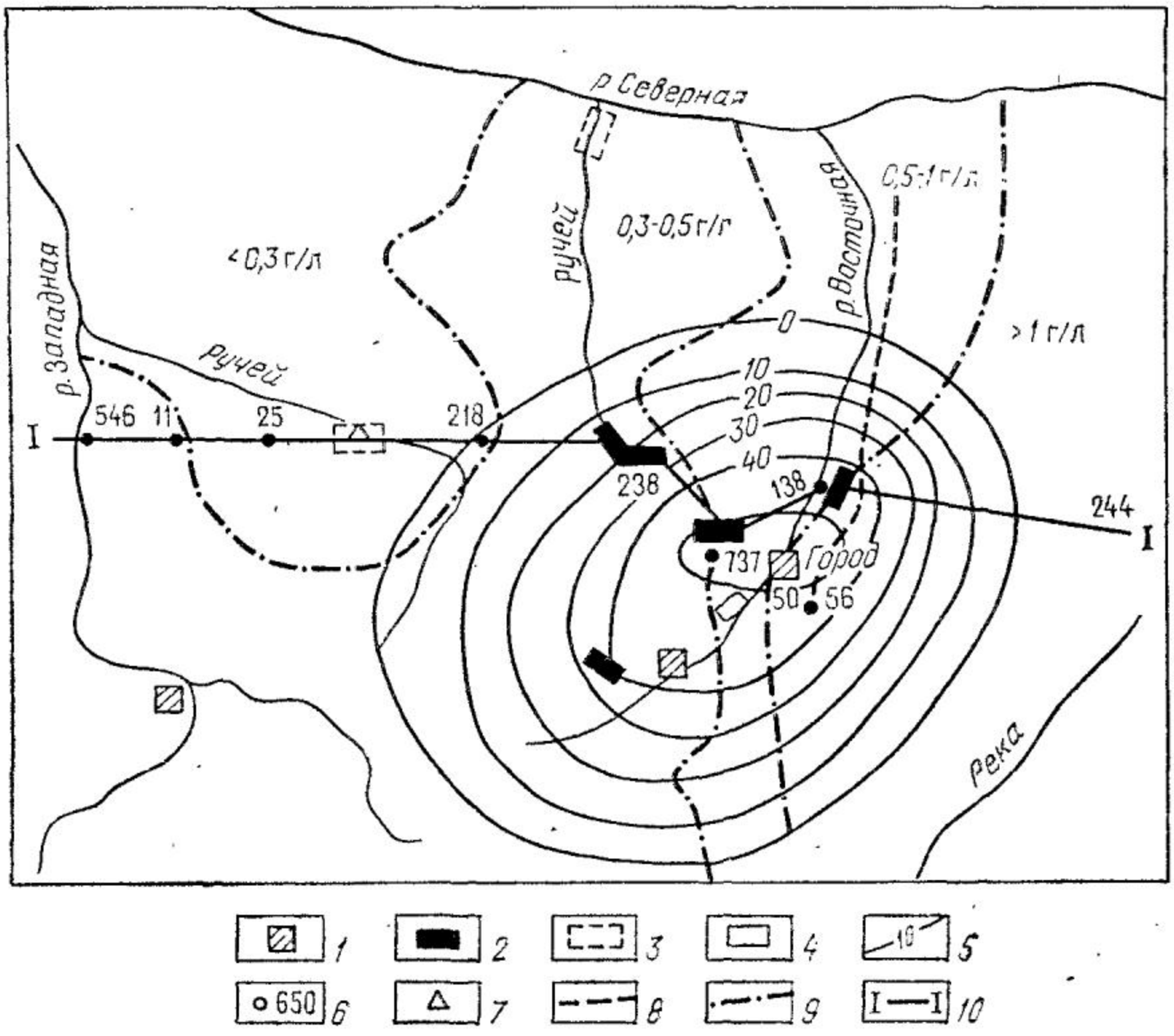


Рис. 57. Схема размещения действующих водозаборов и разведанных участков.

1 — действующий водозабор; *2* — разведанный участок; *3* — перспективный участок; *4* — опоискованный, но забракованный участок; *5* — изолинии понижений уровня в верхнесредиекаменноугольном водоносном горизоите (цифры на изолиниях — понижение в метрах); *6* — скважины и их номера; *7* — куст скважин; *8* — ось флексуры; *9* — границы зон подземных вод с разной минерализаций; *10* — линия разреза

откачки из разведочно-эксплуатационных скважин с двухлучевым расположением наблюдательных скважин с целью изучения гидрогеологических параметров пласта, а также откачка одновременно из двух скважин длительностью более трех месяцев и производительностью близкой к проектной, т. е. — 16 тыс. м^3/сут, с целью изучения опытным путем возможного изменения минерализации пресных подземных вод.

Все опытные работы проводились в условиях неустановившейся фильтрации потока при одном максимальном понижении.

Второй разведочный участок расположен в 6 км к северо-западу от города и имеет протяженность 10,4 км (рис. 58).

Водоносные известняки каменноугольного возраста залегают здесь на глубине 69—129 м. Вскрытая их мощность 312 м при мощности зоны пресных вод до 150 м. Величина пьезометрического напора колеблется в пределах 44—66 м над кровлей го-

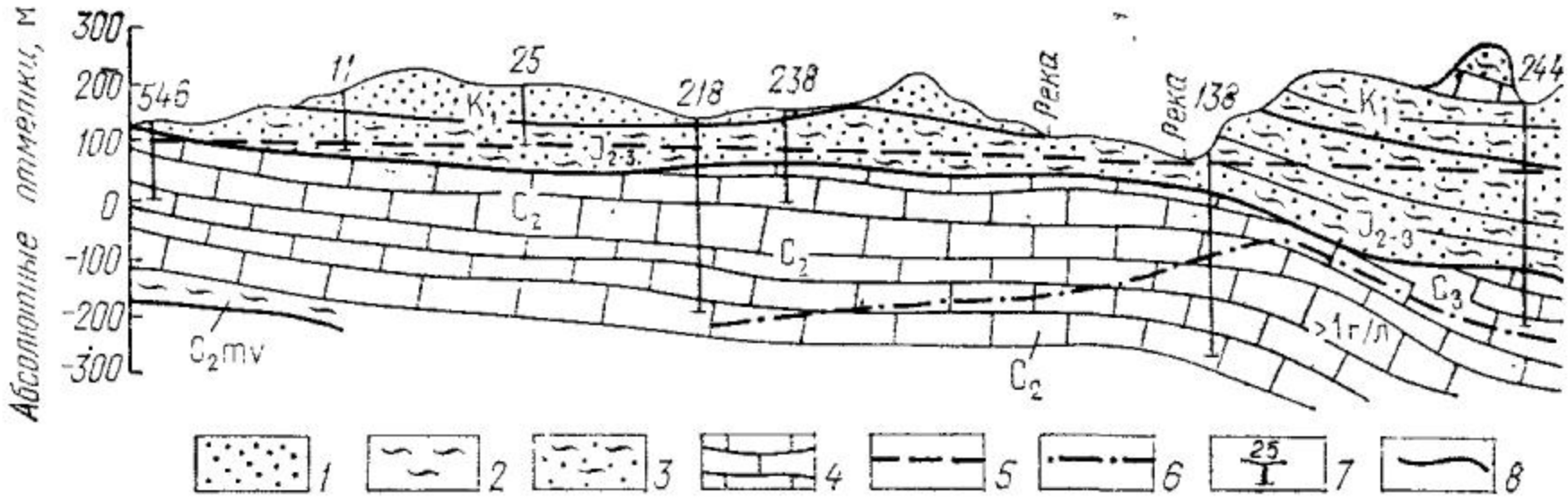


Рис. 58. Схематический гидрогеологический разрез по линии I—I (положение линии I—I см. на рис. 57)

1 — пески; *2* — глины; *3* — глинистые пески и песчаные глины; *4* — известняки; *5* — уровень подземных вод; *6* — граница зоны вод с повышенной минерализацией (>1 г/л); *7* — скважина и ее номер; *8* — стратиграфические границы

ризонта; естественные пьезометрические уровни в скважинах залегают на глубине 10—44 м от поверхности.

Разведочные работы на участке были проведены в две стадии. На стадии предварительной разведки было пробурено 45 скважин, из них 18 поисково-разведочных, 23 разведочных и наблюдательных и 4 разведочно-эксплуатационные. На детальной стадии дополнительно пройдены разведочные скважины. Скважины размещены в основном в виде линейного ряда по выбранной схеме водозаборного сооружения в долине небольшого притока р. Восточной. Опытно-фильтрационные работы проводились с целью определения гидрогеологических параметров пласта; групповая откачка продолжительностью 2,5 мес с суммарным дебитом 19,7 тыс. м^3/сут была направлена, как и в предыдущем случае, для оценки возможного изменения качества воды во времени.

В процессе разведки новых участков были изучены действующие водозаборы, расположенные на площади артезианского бассейна. Они включают водозаборы города и железнодорожной станции. Водозаборы развивались стихийно и представляют собой бессистемно расположенные группы скважин горкомхоза и различных промышленных предприятий. Всего в городе насчитывалось около 80 эксплуатационных скважин, пройденных на водоносный горизонт среднекаменноугольных известняков, а величина водоотбора достигла 70 тыс. м^3/сут, понижение уровня напорных вод в центре депрессии 34 м. Качество воды в процессе эксплуатации не ухудшалось, но в отдельных скважинах отмечалось повышение минерализации вод за счет внедрения вод нижних горизонтов. В связи с разведкой эксплуатационных запасов на новых участках величина общего водоотбора на городских водозаборах была снижена (42 тыс. м^3/сут). Водозабор железнодорожной станции эксплуатируется с 1958 г., суммарный дебит скважин 7—8 тыс. м^3/сут.

В результате длительной эксплуатации и взаимодействия действующих водозаборов городского и железнодорожной станции образовалась единая районная депрессионная воронка.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате выполненных разведочных работ на первом и втором участках и изучения опыта эксплуатации действующих водозаборов были получены исходные гидрогеологические данные для оценки эксплуатационных запасов подземных вод (табл. 23).

Таблица 23. Исходные гидрогеологические данные для оценки эксплуатационных запасов подземных вод

Номер участка, название водозабора	Глубина залегания водоносного горизонта, м	Величина напора над кровлей, м	Мощность водоносного горизонта, м	Водопроводимость пласта, $м^2$/сут	Проектная производительность водозабора, тыс. $м^3$/сут	Число скважин водозабора	Приведенный радиус водозаборов, м	Половина расстояния между скважинами, м	Длина рабочей части скважины, м
I	75—80	63—66	45	650	24	5	480	400	65
II	60—90	44—66	135	1450	62	13	1000	400	50
Городской	111—195	50—75	100	1200	42	30	1500	250	50
Железнодорожной станций	100	80	70	700	8	16	400	200	50

Примечание. 1. Радиус эксплуатационных скважин принимается равным 0,15 м.
2. Коэффициент пьезопроводности равен 10^6 $м^2$/сут.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод была выполнена на первом этапе разведки гидродинамическим методом с помощью аналитических расчетов. Для гидрогеологических условий Сурско-Хоперского артезианского бассейна принята расчетная схема «пласт бесконечный» в плане, в которой границы продуктивного горизонта не оказывают влияния на режим уровня подземных вод на водозаборах при их эксплуатации.

В вертикальном разрезе на прежней стадии изучения Сурского месторождения в расчетах была принята наиболее «жесткая» расчетная схема — однослойная среда, в которой предполагается, что продуктивный водоносный горизонт как бы изолирован сверху и снизу водонепроницаемыми породами.

При взаимодействии скважин понижения уровней подземных вод в них для каждого из водозаборов $S_{расч}$ будет слагаться (по способу сложения течений) из четырех составляющих: по-

нижение уровня в водозаборе (принимаемом как «большой колодец») от его собственной работы S_0; понижение уровня, вызванного влиянием других водозаборов ΣS_i; дополнительного понижения,. обусловленного взаимодействием скважин внутри водозабора, $S_{доп}$ и понижения уровня, вызванного несовершенством скважин по степени вскрытия водоносного горизонта, $S_н$:

$$S_{расч} = S_0 + \Sigma S_i + S_{доп} + S_н. \qquad (20.1)$$

Понижение уровня на водозаборе от его собственной работы можно оценить по формуле

$$S_0 = \frac{Q_0}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at}{R_0^2}, \qquad (20.2)$$

где Q_0 — общая производительность водозабора, для которого ведутся расчеты; km — водопроводимость пласта; t — время эксплуатации водозабора; a — коэффициент пьезопроводности продуктивного пласта; R_0 — приведенный радиус укрупненного водозабора («большого колодца»), рассчитанный по формулам $R_0 = 0{,}2\ l$ (l — длина водозабора для линейного ряда скважин) и $R_0 = 0{,}47\sqrt{F/\pi}$ (F — площадь размещения водозаборных скважин) для площадного водозабора.

Влияние на режим уровня от взаимодействия соседних водозаборов учтено как сумма срезок от их работ по следующей зависимости:

$$\Sigma S_i = \frac{Q_1}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at_1}{r_{0-1}^2} + \frac{Q_2}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at_2}{r_{0-2}^2} + \ldots + \frac{Q_n}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at_n}{r_{0-n}^2}, \qquad (20.3)$$

где $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ — дебиты влияющих водозаборов; $t_1, t_2, \ldots, t_n$ — время работы влияющих водозаборов; $r_{0-1}, r_{0-2}, \ldots, r_{0-n}$ — расстояние влияющих водозаборов от водозабора, где рассчитываются срезки.

В расчетах принято среднее значение проводимости пласта.

Дополнительные понижения уровня в скважинах расчетного водозабора за счет их взаимодействия находили по формуле

$$S_{доп} = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{b}{2\pi r_0}, \qquad (20.4)$$

где Q — расчетная производительность скважины; r_0 — радиус водоприемной части скважины; b — половина расстояния между скважинами. Для площадного расположения скважин городского водозабора b определена по формуле $b = (\sqrt{F/n})/2$, где F — площадь водозабора, м; n — число скважин.

Дополнительное понижение, вызванное несовершеиством скважин, учтено по следующей зависимости:

$$S_н = \frac{Q}{2\pi km}\zeta, \qquad (20.5)$$

где ζ — гидравлическое сопротивление (поправка Н. Н. Веригина), зависящая от соотношений m/r_0, l/m, где r_0, m и l — соответственно радиус водоприемной части скважины, мощность водоносного горизонта и длина фильтра, м (находится по таблице [11]).

Результаты аналитических расчетов показали, что при заданной производительности водозаборов величины расчетных поиижений уровней существенно меньше допустимых. При этих условиях разведанные запасы являются обеспеченными.

В последующие годы на месторождении были проведены разведочные работы еще на двух перспективных участках. Эти работы выполнялись по той же методике.

В целом по всем разведочным участкам месторождения, действующим водозаборам, а также по перспективной прилегающей площади были оцеиены и представлены в ГКЗ СССР эксплуатационные запасы подземных вод в количестве, указанном в табл. 24.

Таблица 24

Номер участка, водозабор	Утвержденные запасы, тыс. м³/сут	Расчетные понижения, м	Допустимое понижение (напор + ½ мощности зоны пресных вод), м
I	24	111	110
II	62	104	120
Водозабор города	42	95	110
Водозабор ж/д станции	8	86	110
IV	32	83	130
V	41	72	130
Территория в радиусе 25 км от города (запасы категории C_2)	26	—	110—120
Всего	235		

Из этого общего количества разведанных запасов к промышленным категориям А и В были отнесены запасы в количестве 196 тыс. м³/сут (по старой классификации), из них 100 тыс. м³/сут — к категории А и 96 тыс. м³/сут — к категории В. К категории C_1 были отнесены запасы в количестве 13 тыс. м³/сут, а к категории C_2 (перспективные запасы) — 26 тыс. м³/сут.

На первом этапе исследований необходимо организовать на

всех водозаборных участках изучение режима подземных вод с целью:

а) уточнения расчетной схемы и изучения условий взаимодействия в процессе эксплуатации верхних водоносных горизонтов, приуроченных к мезо-кайнозойским отложениям с подземными водами продуктивного горизонта;

б) определения степени фильтрационной неоднородности водовмещающих карбонатных пород в плане, поскольку водозаборные участки охватывают сравнительно большую площадь распространения продуктивного водоносного горизонта;

в) установления возможного изменения качества пресных подземных вод продуктивного водоносного горизонта за счет подтягивания минерализованных подземных вод снизу.

ИССЛЕДОВАНИЯ В СТАДИЮ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В стадию эксплуатационной разведки основным видом гидрогеологических исследований является комплексное изучение режима подземных вод во всех водоносных горизонтов, распространенных на месторождении. Перед комплексом режимных наблюдений были поставлены следующие задачи:

а) изучение условий формирования депрессионных воронок на всех действующих водозаборах;

б) изучение режима суммарного отбора подземных вод на каждом водозаборном участке и по всему месторождению в целом;

в) уточнение значений гидрогеологических параметров продуктивного водоносного горизонта;

г) изучение режима химического состава подземных вод;

д) изучение условий гидравлической связи поверхностных и подземных вод, включая подземные воды четвертичных отложений, мезо-кайнозойских и продуктивных горизонтов.

Для решения перечисленных задач на водозаборных участках и между ними необходимо создать опорную наблюдательную сеть и организовать поинтервальное опробование из наблюдательных скважин.

Наблюдательные скважины на участках располагались в виде ярусной системы на каждый водоносный горизонт, как это показано на рис. 58. К сожалению, на нижний водоносный горизонт, содержащий минерализованную воду, была пройдена одна наблюдательная скважина, что оказалось недостаточным для общей оценки условий миграции минерализованных вод. Всего на водозаборных участках для создания опорной режимной сети была пробурена 71 наблюдательная скважина по шести магистральным лучам, охватывающим площадь в радиусе 34—62 км.

Стационарные режимные наблюдения за качеством отбираемых подземных вод продуктивного горизонта показали, что

в 1976 г. по сравнению с 1964 г. на городских водозаборах (в 21 скважине) произошло увеличение общей минерализации, общей жесткости и содержания фтора, хлоридов, сульфатов. Так, общая минерализация возросла от 0,76 до 0,87 г/л, содержание фтора с 2,33 до 3,14 мг/л, хлоридов со 111 до 277 мг/л, сульфатов со 180 до 280 мг/л. Кроме того, произошло изменение химического состава подземных вод, выразившееся в сокращении мощности зоны гидрокарбонатных вод и распространении вод гидрокарбонатно-сульфатного и гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридного составов (за счет внедрения подземных вод нижних водоносных горизонтов).

Наблюдениями за режимом уровней подземных вод по району установлено, что общая площадь депрессионной воронки достигла примерно 1500 км². Снижение уровня в центре депрессии достигло 66,5 м, остаточные напоры не превышали 20 м. Средние годовые темпы снижения уровня при эксплуатации на 1976 г. достигали: 2,85 м в центре депрессии; 1,7—2,8 м в радиусе 3,6—9,5 км от центра и 1,4—2,0 м на расстоянии 22—24 км от центра. Отмечено также сравнительно небольшое (0,2—0,3 м) снижение уровня в верхнем нижнекелловей-батском водоносном горизонте.

Таким образом, на водозаборных участках в процессе эксплуатации подземных вод продуктивного горизонта наметилась тенденция к ухудшению качества воды питьевого назначения, что в дальнейшем могло привести к выходу из строя хозяйственно-питьевых водозаборов.

Учитывая сложность гидрогеохимических условий территории, фильтрационную неоднородность водовмещающих пород, наличие взаимодействия между водоносными горизонтами, а также между подземными и поверхностными водами, было принято решение по результатам эксплуатационной разведки произвести переоценку эксплуатационных запасов подземных вод в целом по месторождению методом математического моделирования на аналоговых устройствах, что позволит выбрать для данного месторождения наиболее рациональные условия эксплуатации и оценить общие его перспективы.

На первом этапе моделирования были решены обратные задачи по опыту эксплуатации водозаборов с целью уточнения расчетных гидрогеологических параметров водоносных пород и расчетной схемы. Моделирование было выполнено под руководством В. С. Плотникова.

Для моделирования была принята расчетная схема из трех водоносных слоев (комплексов), распространенных в плане, для условий «бесконечного» пласта с двумя разделяющими прослоями слабопроницаемых пород, а именно:

— первый слой — водоносный комплекс в мезо-кайнозойских породах с пресными подземными водами;

— второй слой — водоносный комплекс в породах верхне-среднекаменноугольного возраста с подземными водами;

— третий слой — водоносный комплекс в породах среднекаменноугольного возраста с минерализованными (1—3 г/л) водами.

Первым разделяющим прослоем являются глины юрского возраста, перекрывающие породы водоносного комплекса палеозоя. Между вторым и третьим водоносными комплексами в разрезе и по простиранию нет четкого разделяющего слоя, выдержанного в региональном плане. В южной и западной частях района разделяющими являются верейские глины, на остальной территории — ростиславские глины между мячковским и каширским стратиграфическими горизонтами.

Для моделирования приняты следующие условия:

а) площадь модели охватывает примерно 20 тыс. км^2 распространения всех водоносных комплексов;

б) водопроводимость пород мезо-кайнозойского водоносного комплекса была принята равной (по данным опытных откачек) 50—150 м^2/сут. Водоотдача водовмещающих песков принята равной 0,1. Исходные величины гидравлического сопротивления между мезо-кайнозойским водоносным комплексом и реками приняты равными $A_0 = 10$ сут, сопротивление келловей-кимеридж-оксфордской толщи $A_0 = 10^6$ сут, сопротивление байосских глин $A_0 = 10^5$ сут;

в) водопроводимость пород второго водоносного комплекса колеблется по площади в пределах 300—4000 м^2/сут (рис. 59); коэффициент пьезопроводности 10^6 м^2/сут;

г) для третьего водоносного комплекса, содержащего минерализованные воды, величина водопроводимости была принята равной 50 м^2/сут (по данным опытных откачек);

д) по границам модели были заданы граничные условия II рода: $Q = 0$.

Как отмечалось выше, при моделировании первого этапа вначале решались обратные задачи, направленные на уточнение параметров водоносных комплексов, условий взаимодействия водоносных горизонтов и значений проницаемости разделяющих пород. Для этого на модели были воссозданы история и опыт работы действующих водозаборов города и железнодорожной станции и водозабора на первом разведочном участке (рис. 60).

Первый вариант обратной задачи решали при исходных расчетных параметрах. При этом выявили, что в продуктивном водоносном комплексе понижение уровня подземных вод на модели получается меньше, чем фактическое. Аналогичные условия были выявлены и в мезо-кайнозойском водоносном комплексе, за исключением района города, где понижения уровня на модели оказались больше фактических.

Во втором варианте моделирования были уточнены величина питания подземных вод, емкость пород мезо-кайнозойского водоносного комплекса и скорректированы значения сопротивлений между водоносными комплексами пресных и солоноватых вод, после чего было достигнуто удовлетворительное соответ-

ствие понижений уровня подземных вод на модели и в природных натурных условиях.

Решение обратных задач (моделирование опыта эксплуатации) показало следующее:

а) величины водопроводимости пород для всех водоносных горизонтов по площади практически не изменились по сравнению с исходными данными, полученными при детальной разведке месторождения;

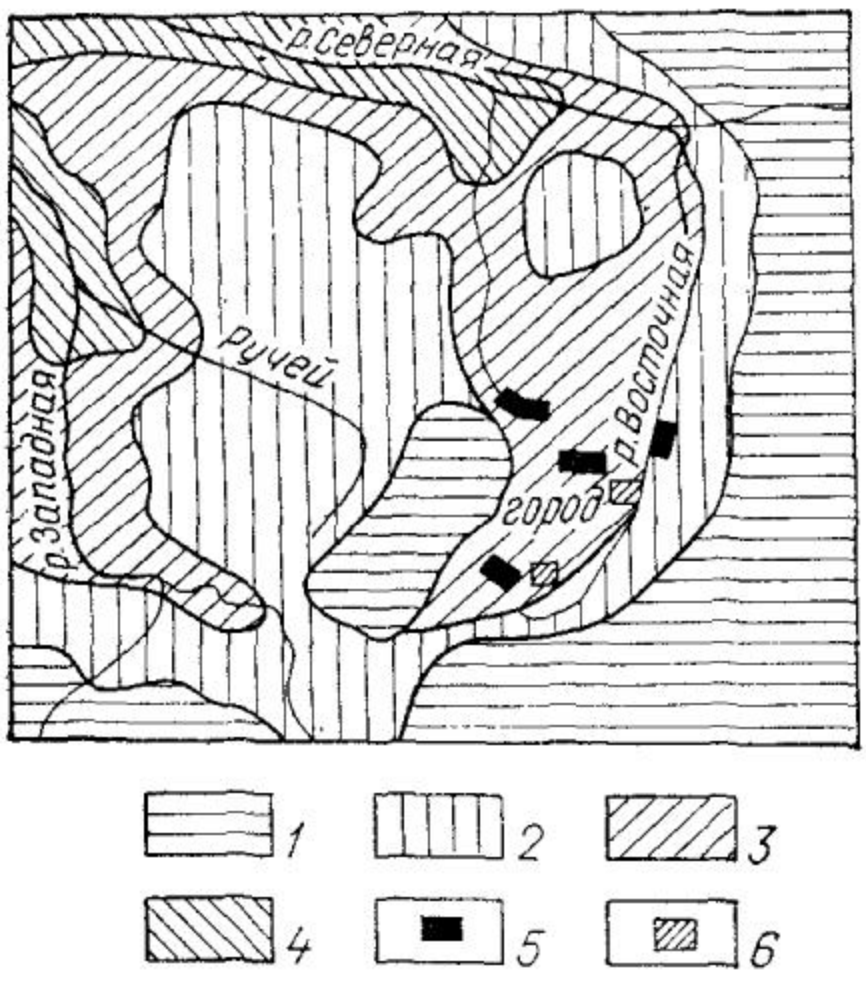


Рис. 59. Схематическая карта водопроводимости верхне-среднекаменноугольного водоносного горизонта.

1—4 — зоны с различной водопроводимостью: *1* — <500, *2* — 500—1000, *3* — 1000—2000; *4* — 2000—4000 м²/сут; *5* — разведанные участки и их номера; *6* — действующие водозаборы

б) водоотдача пород водоносных комплексов составляет: для мезо-кайнозойского $7{,}3 \cdot 10^{-3}$, для верхне - среднекаменноугольного водоносного комплекса, содержащего пресные подземные воды, $2{,}1 \cdot 10^{-4}$, для среднекаменноугольного водоносного комплекса с солоноватыми водами — $1{,}24 \cdot 10^{-4}$;

в) скорректированные значения гидравлического сопротивления подрусловых отложений мелких рек оцениваются для большей части рек величиной $A_0 = 420$ сут, по долинам рек Восточная, Северная и Западная $A_0 = 10$ сут.

Такие же задачи были решены и для участков, где породы мезо-кайнозойского и продуктивного водоносных комплексов залегают вблизи долин современных рек.

Результаты моделирования первого этапа позволили также произвести расчеты структуры и баланса эксплуатационных запасов подземных вод. Было установлено, что на период эксплуатации (1976 г.) из 189 тыс. м³/сут воды, отбираемой действующими водозаборами, формируется за счет:

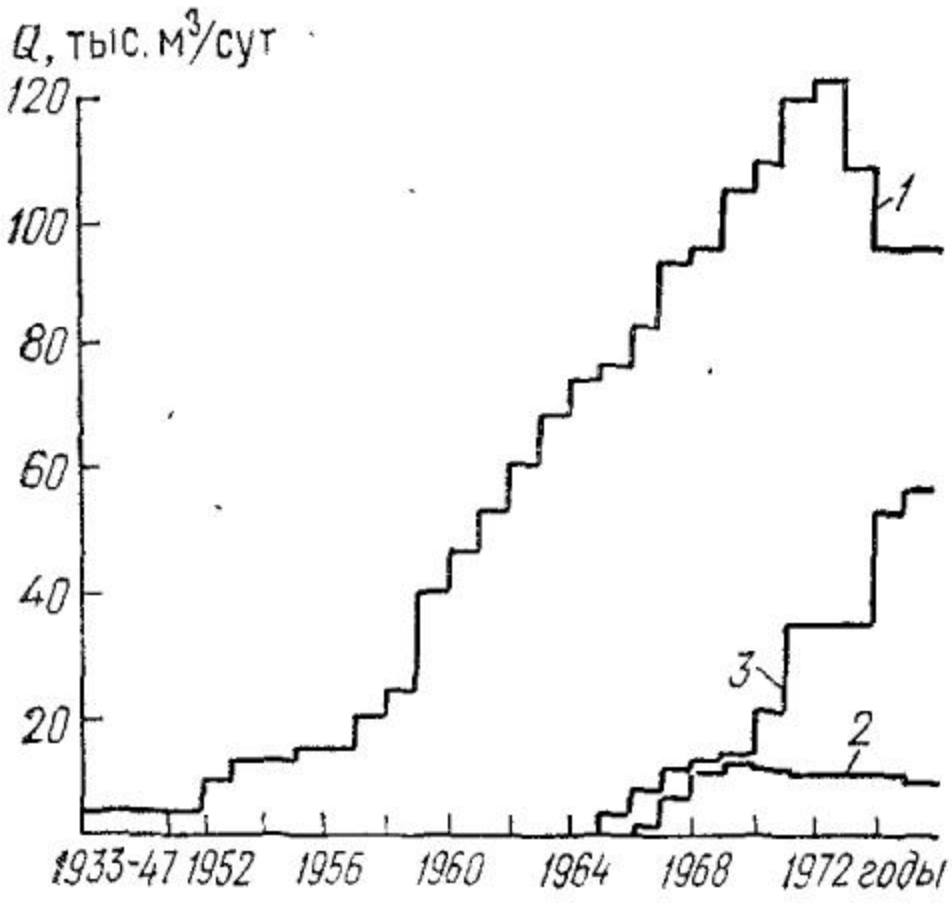


Рис. 60. Графики водоотбора по городу *(1)*, участкам *(2)* и *(3)* за городом

— перетока подземных вод из мезо-кайнозойского водоносного горизонта — 176,9 тыс. м³/сут (из них 41,7 тыс. м³/сут за счет осушения комплекса и 135,2 тыс. м³/сут за счет притока из рек);

— береговой и донной инфильтрации рек местной гидрографической сети 11,5 тыс. м³/сут;

— сработки упругих запасов подземных вод продуктивного водоносного комплекса 1—2 тыс. м³/сут.

Таким образом, упругие запасы подземных вод каменноугольных отложений составляют менее 1 % от общего водоотбора, емкостные (естественные) запасы мезо-кайнозойского водоносного комплекса около 22 % и инфильтрация поверхностных вод (питание из рек) — около 77 %.

На втором этапе решалась основная задача по прогнозной оценке эксплуатационных запасов и их рациональных условий отбора. Были приняты следующие условия отбора.

1. Срок эксплуатации принят равным 30 годам (с 1980 по 2010 г.). Весь период эксплуатации (с 1983 по 2010 г.) моделируется как единый непрерывный процесс с последовательным включением отдельных водозаборов.

2. Допустимое понижение уровня подземных вод принималось равным величине напора, а также с учетом интервала осушения продуктивного пласта (15—20 м).

3. Возможное изменение водопроводимости пород при частичном осушении пород водоносных комплексов не учитывалось.

4. По границам модели принималось условие II рода: $Q = 0$.

5. Речная сеть местной сети на модели располагалась преимущественно на породах мезо-кайнозойского водоносного комплекса и в меньшей степени на породах верхне-среднекаменноугольного водоносного комплекса (на участке размыва мезо-кайнозойских отложений).

Речная сеть района моделировалась как граничные условия III ($Q=f(S, t, A_0)$ и II рода ($Q=\text{const}$). Критериями перевода рек с условий III рода на условия II рода являлись понижения уровней под рекой в пределах напорной фильтрации (для рек Восточная, Западная и Северная — 10 м, для остальных — 5 м) и расход рек.

6. Прогноз возможного изменения минерализации пресных подземных вод при эксплуатации выполнялся по фрагменту карты масштаба 1 : 50 000 для территории 36×40 км². Западная граница врезки взята по контуру минерализации $C = 0{,}5$ г/л, восточная — по контуру минерализации $C = 1$ г/л. Северная и южная — по фактической минерализации на основе карт гидрохимического состава. Расчеты выполнялись для постоянных значений минерализации на контурах фрагмента.

Расчет изменения минерализации воды в каждой узловой точке модели был выполнен по принципу балансового смещения по следующей зависимости:

$$C_{ср}Q_т = C_мQ_м + C_2Q_{2_i} + \sum_{i=1}^{4} C^i_{3-2}Q^i_{3-2}, \qquad (20.6)$$

где $C_{ср}$ и $C_т$ — средняя минерализация и расход в узловой точке; $C_мQ_м$ — минерализация воды и приток из мезо-кайнозойского водоносного комплекса и водоносного комплекса среднего карбона; C^i_{3-2}, Q^i_{3-2} — минерализация воды и приток из соседних ячеек эксплуатируемого водоносного комплекса верхне- и среднекаменноугольного водоносного комплекса.

Для расчетов принималось, что минерализация воды в мезокайнозойском водоносном комплексе равна 0,5 г/л, в нижнем комплексе среднекаменноугольного возраста приняты два значения — 3 и 6 г/л.

Расстояние миграции частицы воды за 10^4 сут определялось по приближенной формуле

$$l = \frac{kI}{\mu} t, \qquad (20.7)$$

где k — коэффициент фильтрации, равный в среднем 8,3 м/сут; μ — водоотдача (эффективная пористость), $2 \cdot 10^{-2}$; I — уклон потока; t — время эксплуатации, $t = 10^4$ сут.

Всего на модели были решены три варианта прогнозных задач в следующей постановке.

Первый вариант. На городском водозаборе и водозаборе железнодорожной станции задан существующий водоотбор, по остальным участкам величина водоотбора в соответствии с утвержденными запасами по сумме категорий $A + B + C_1$. Дополнительно подключался водозабор поселка с заявленной потребностью 50 тыс. м^3/сут. Общий суммарный водоотбор на модели составляет 324,5 м^2/сут.

Решение задачи по этому варианту на модели показало, что понижения уровня подземных вод на водозаборах на конец расчетного периода эксплуатации будут находиться в пределах величин пьезометрических напоров, за исключением водозабора железнодорожной станции и водозабора на втором участке, где расчетные понижения уровня соответственно на 25 и 15 м превысят величины пьезометрических напоров продуктивного горизонта, однако при этом общая величина понижений уровня останется в пределах допустимых значений.

Балансовые расчеты по этому варианту дали величину возможного притока минерализованных вод снизу к водозаборам с востока примерно в количестве 10—15 тыс. м^3/сут.

В районе действующих водозаборов из нижнего водоносного горизонта в эксплуатируемые скважины (по вертикали) может проникать до 12,8 тыс. м^3/сут минерализованных вод. Однако при этом на окружающей территории будет происходить переток пресных вод в зону минерализованных вод в количестве до 10 тыс. м^3/сут. При этих условиях минерализация воды на го-

родском водозаборе может возрасти до 1,25—1,5 г/л, на водозаборе железнодорожной станции до 2,3 г/л, на участке I — до 1,1 г/л. По остальным участкам минерализация воды не превысит допустимых пределов по ГОСТу (табл. 25).

Второй вариант от первого отличается уменьшением нагрузки на действующие водозаборы до значений эксплуатационных запасов, утвержденных в ГКЗ СССР (с 98 до 42 и с 17,5 до 8 тыс. м^3/сут). Результаты моделирования по этому варианту показали, что сокращение водоотбора на указанных водозаборных участках не даст существенного улучшения качества отбираемой пресной воды из продуктивного горизонта (см. табл. 29).

Третий вариант. Отличался от первого варианта вводом в эксплуатацию дополнительных водозаборов на перспективных участках в долине р. Северная: на участке VI — 150 тыс. м^3/сут; на участке VII — до 60 тыс. м^3/сут. Моделированием по этому варианту было установлено, что понижение уровней подземных вод по всем водозаборам останутся в пределах допустимых значений. Общий расход водозаборов с пресной водой для промышленного района в целом составит 274 тыс м^3/сут. При этом использование подземных вод, отбираемых на городском, железнодорожном водозаборах и на водозаборе I участка для хозяйственно-питьевых нужд, будет возможно лишь при смешении их с пресной водой, так как будет происходить миграция соленых вод снизу со стороны водоносного комплекса нижнего карбона.

Как видно из данных табл. 25, в результате моделирования были выполнены весьма сложные условия миграции снизу в продуктивный горизонт подземных вод повышенной минерализации на ряде водозаборных участков. К сожалению, оказалось, что в процессе проведения гидрогеологических исследований в стадию эксплуатационной разведки месторождения в недостаточном объеме была получена исходная информация для однозначного решения задач по выбору и обоснованию рациональной схемы отбора пресных подземных вод системой взаимодействующих групповых водозаборов с сохранением их качества в длительный период эксплуатации. Именно поэтому приведенные выше решения задач по оценке оптимального режима эксплуатации пресных подземных вод следует рассматривать как предварительные, требующие в дальнейшем более достоверной оценки.

В связи с этим было принято решение продолжить детальные гидрогеологические исследования на месторождении в стадию эксплуатации в следующих основных направлениях:

а) продолжить комплексное изучение режима эксплуатации по всем групповым водозаборным сооружениям;

б) осуществить строительство дополнительной наблюдательной сети для более достоверного изучения пород между зонами пресных и солоноватых вод в разрезе и по площади, в том числе

Таблица 25. Эксплуатационные запасы подземных вод на действующих водозаборах, разведанных и перспективных участках по данным моделирования (по В. С. Плотникову)

Номер участка, водозабор	Исходная величина напора, м	Фактические данные на 1976 г.			Результаты моделирования								
					по первому варианту			по второму варианту			по третьему варианту		
		Q, тыс. м³ с	S, м	C, г л	Q, тыс. м³ сут	S, м	C, г л	Q, тыс. м³ сут	S, м	C, г л	Q, тыс. м³ сут	S, м	C, г л
Городской	80	98,3	65	0,86	98	87,2	1,45	42	58,3	1,40	98	94,3	1,45
I	75	9,5	56	1,03	24	75,6	1,10	24	53,4	1,10	24	82,5	1,10
II	65	56,3	50	0,48	62	79,6	0,5—1,0	62	57,1	0,65—0,95	62	87,1	0,5—1,0
IV	60	—	35	0,5	32	58,5	0,60	32	44,1	0,60	32	68,2	0,60
Водозабор ж/д станции	90	17,5	45	0,67	17,5	77,5	2,30	8	54,3	1,62	17,5	84,3	2,30
V	55	—	42	0,6	41	78,5	1,03	41	44,1	1,0	41	85,9	1,03
VII	40	—	—	0,5	—	—	—	—	—	—	60	63,6	—
VI	10	—	—	0,5	—	—	—	—	—	—	150	12—20	—
Водозабор поселка	52	8,0	65	0,5	50	44,5	—	50	42,1	—	50	51,1	—

Примечание. Принятое допустимое понижение равно 100 м.

по профилю к востоку от города (в сторону флексуроподобного поднятия палеозойских пород);

в) в связи с этим необходимо выполнить дополнительный объем бурения гидрогеологических скважин.

Дополнительная гидрогеологическая информация позволит в дальнейшем провести вновь переоценку эксплуатационных запасов пресных подземных вод и обосновать наиболее рациональный отбор их по групповым водозаборным сооружениям.

Глава 21

РАЗВЕДКА СЕРГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сергинское месторождение подземных вод в соответствии с принятой классификацией (см. табл. 4) относится к первому типу (подтипу «б») (месторождение подземных вод узких речных долин), в строении которого принимают участие два водоносных горизонта. На площади месторождения отмечаются сложные условия возобновления эксплуатационных запасов путем привлечения поверхностных вод, минимальный расход которых в год при 95%-ной обеспеченности меньше, чем заявленная потребность в воде. В связи с этим по степени сложности гидрогеологических условий Сергинское месторождение относится ко второй группе.

Как отмечалось ранее, метод математического моделирования в настоящее время широко используется для решения самых различных фильтрационных задач. Весьма эффективно (как в научном, так и в производственно-экономическом отношении) моделирование может быть использовано на стадии предварительной и детальной разведки месторождения подземных вод, так как в этом случае предоставляется большая возможность корректировать объемы проектируемых разведочных гидрогеологических работ и их размещение по площади месторождения. В задачу моделирования в стадию разведки объекта входит прежде всего уточнение методики объемов буровых и опытно-фильтрационных работ, т. е. наиболее дорогостоящих и трудоемких работ при гидрогеологических исследованиях.

Ниже рассматривается пример эффективного использования моделирования при разведке инфильтрационного водозабора в долине р. Серги, на Урале.

Район Сергинского месторождения в геологическом отношении относится к Уфимо-Демидовской межгорной депрессии, имеющей меридиональное простирание и протяженность около 80 км при ширине 9—12 км. Депрессия сложена преимущественно известняками силурийского и девонского возраста и в рельефе представляет собой плато с интенсивным проявлением раз-

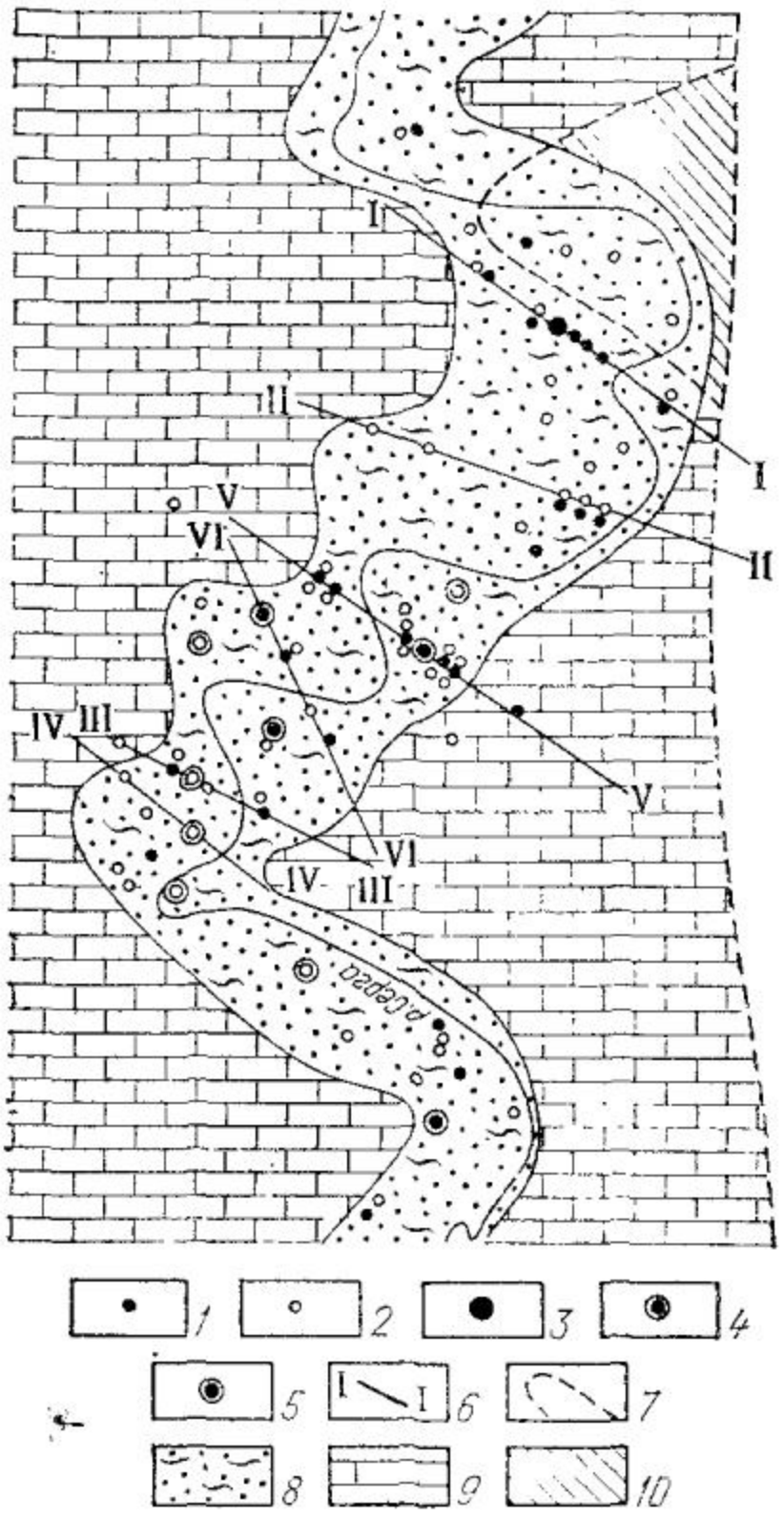


Рис. 61. Схема расположения скважин разведочной сети на стадии предварительной разведки.

1 — разведочные и наблюдательные скважины на аллювий; *2* — то же, на известняки; *3* — центральные скважины кустовых откачек; *4* — проектные разведочно-эксплуатационные скважины; *5* — то же, совпадающие с центральными скважинами опытных откачек; *6* — линии гидрогеологических профилей; *7* — кривая тектонического нарушения; *8* — аллювиальные отложения долины р. Серги; *9* — рифогенные известняки — основной эксплуатируемый горизонт подземных вод; *10* — суглинистые отложения

личных карстовых форм. Собственно месторождение приурочено к долине р. Серги с правобережным ее притоком — р. Демид. Долина р. Серги глубоко врезана в известняки и выполнена аллювиальными гравийно-галечниковыми отложениями, залегающими непосредственно на палеозойских известняках. Мощность аллювиальных образований изменяется на месторождении от 10 до 50 м (в переуглубленной части долины) при ширине долины от 0,5 до 1,5 км (рис. 61).

Основным водоносным горизонтом являются известняки, характеризующиеся весьма неоднородной трещиноватостью и закарстованностью. Ширина полосы распространения известняков составляет около 7 км. Максимальная их проницаемость локализуется преимущественно вдоль русла реки и характеризуется коэффициентом водопроводимости от 1 до 3 тыс. м^2/сут. На водораздельных площадях значение этого параметра в среднем составляет 100 м^2/сут. Разведанная мощность известняков на участке 250—300 м, наиболее водообильная часть их, по данным расходометрии, составляет порядка 100 м.

Аллювиальные отложения долины р. Серги также характеризуются неоднородной проницаемостью как в плане, так и особенно в разрезе, что обусловлено значительной глинизацией гравийно-галечникового материала, наличием в разрезе линз и слоев глин, супесей и суглинков. Это приводит к резкой анизотропии водопроводящих свойств аллювиальных образований. Так, величина коэффициента горизонтально направленной фильтрации в породах изменяется от 0,5 до 10 м/сут. Основной водоносный горизонт известняков палеозоя на месторождении отделен от реки водоносным горизонтом аллювиальных отложений.

Среднегодовой расход р. Серги года 95%-ной обеспеченности в пределах месторождения составляет 7 м³/с; минимальный расход реки на тот же год обеспеченности, наблюдаемый в период январь — март, составляет 0,9 м³/с.

Учитывая сравнительно слабую проницаемость песчано-галечниковых отложений и достаточно высокую проницаемость водовмещающих известняков в подрусловой зоне р. Серги, схему водозабора для данных условий решено принять в виде линейного ряда скважин, водоприемная часть которых располагалась бы непосредственно в известняках. Ранее выполненными исследованиями (поиски и предварительная разведка) были установлены следующие основные источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод на водозаборном участке: а) фильтрационные потери речных вод в песчано-галечниковых отложениях; б) емкостные (естественные) запасы этих образований; в) в меньшей степени естественные ресурсы трещинно-карстовых вод карбонатных пород, формирующихся за счет инфильтрации атмосферных осадков.

С целью изучения режима поверхностного стока реки — основного источника формирования эксплуатационных запасов подземных вод — были проведены балансово-гидрометрические исследования, а также проанализированы гидрологические материалы местной гидрометрической службы.

В процессе поисково-разведочных работ выяснено, что заданная общая производительность проектируемого водозабора (линейного ряда скважин) в 1,6 раза превышает меженный расход реки года 95%-ной обеспеченности. Последний, как отмечалось, достигал порядка 920 л/с, а заявленная потребность в воде 1500 л/с. Однако в период, когда отбор подземных вод на водозаборном участке будет превышать меженный сток реки, эксплуатационные запасы могут формироваться за счет естественных (емкостных) запасов грунтовых вод песчано-галечниковых аллювиальных отложений. Поскольку среднегодовой расход реки значительно превышает заявленную потребность, в период паводка может происходить восполнение сработанных естественных запасов грунтовых вод.

В связи с такими сложными условиями формирования эксплуатационных запасов возникла необходимость детально изучить при разведке месторождения условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод, подземных вод песчано-галечниковых отложений и карбонатных пород, а также условия периодической сработки естественных запасов подземных вод в межень с последующим их восполнением в паводок.

Это обстоятельство определило некоторую специфику методики проведения предварительной разведки и вызвало необходимость при проектировании работ на стадии детальной разведки применить метод математического моделирования.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ В СТАДИЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

В стадию детальных поисковых работ в районе была проведена специализированная гидрогеологическая съемка масштаба 1 : 100 000, сопровождавшаяся геофизическими исследованиями и картировочным бурением, с целью определения общих условий формирования подземных вод и общих перспектив района. Затем на площади выявленных перспективных участков было выполнено бурение поисковых скважин, размещенных по широтным поисковым профилям. Общий объем бурения был размещен на шести профилях. Глубина скважин достигала 175—180 м. Из всех скважин были проведены общие и опытные откачки, а также отобраны пробы воды на химический анализ. В результате выполненных детальных поисковых работ был выявлен наиболее перспективный Сергинский участок для постановки работ в стадию предварительной разведки. В стадию предварительной разведки работы проводились в два этапа.

На первом этапе на площади Сергинского месторождения, имеющего протяженность более 25 км вдоль р. Серга, были пробурены 42 разведочные скважины, из которых 24 пройдены непосредственно в водоносных известняках, а 18 для вскрытия грунтовых вод в аллювиальных образованиях. Скважины располагались в виде профилей (I—VI), схема размещения которых показана на рис. 61. Все скважины были опробованы одиночными опытными откачками, а в пределах каждого разведочного профиля были проведены кустовые откачки. Во всех разведочных скважинах были проведены геофизические каротажные исследования.

На втором этапе предварительной разведки были выполнены специальные гидрогеологические исследования с целью детального изучения степени гидравлической связи между водоносными аллювиальными песчано-галечными отложениями и водоносными известняками. Эти работы проводились с целью обоснования выбранной схемы водозаборного сооружения и режима его работы. Для изучения этого вопроса в долине р. Серги были пройдены шесть дополнительных гидрогеологических створов (профилей), состоящих каждый из двух-трех пар скважин — двойных пьезометров, оборудованных для наблюдения за изменением уровня грунтовых вод при откачках из скважин, пройденных в водоносных известняках (рис. 62). Всего было пробурено 26 скважин, располагавшихся парами на расстоянии 15—20, 50 и 100 м от уреза реки. Для наблюдений за речными водами на каждом профиле оборудовался свайный водомерный пост.

В этот этап исследований было выполнено 19 опытных откачек из скважин, пройденных в водоносных известняках, и 12 откачек из скважин, вскрывших грунтовые воды. В резуль-

тате натурных экспериментальных работ были определены основные гидрогеологические параметры, характеризующие степень гидравлической связи поверхностных и подземных вод. К их числу относятся:

R_2 — дополнительное гидравлическое сопротивление, обусловленное заиленностью ложа русла реки и неоднородностью литологического состава подрусловых отложений; его значение на участке изменяется от 0,3 до 7,6;

λ — обобщенный параметр заиленности и неоднородности от $4{,}6 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}8 \cdot 10^{-2}$ 1/м;

ΔL — параметр, учитывающий в расчетах фильтрационное сопротивление ложа реки (значение его изменяется от 65 до 2338 м);

k_0 — коэффициент вертикальной фильтрации аллювиальных отложений (изменяется от 0,6 до 1,55 м/сут);

km — коэффициент водопроводимости водоносных известняков (изменяется от 280 до 3400 м²/сут);

μ — коэффициент водоотдачи аллювиальных отложений (изменяется от 0,1 до 0,13).

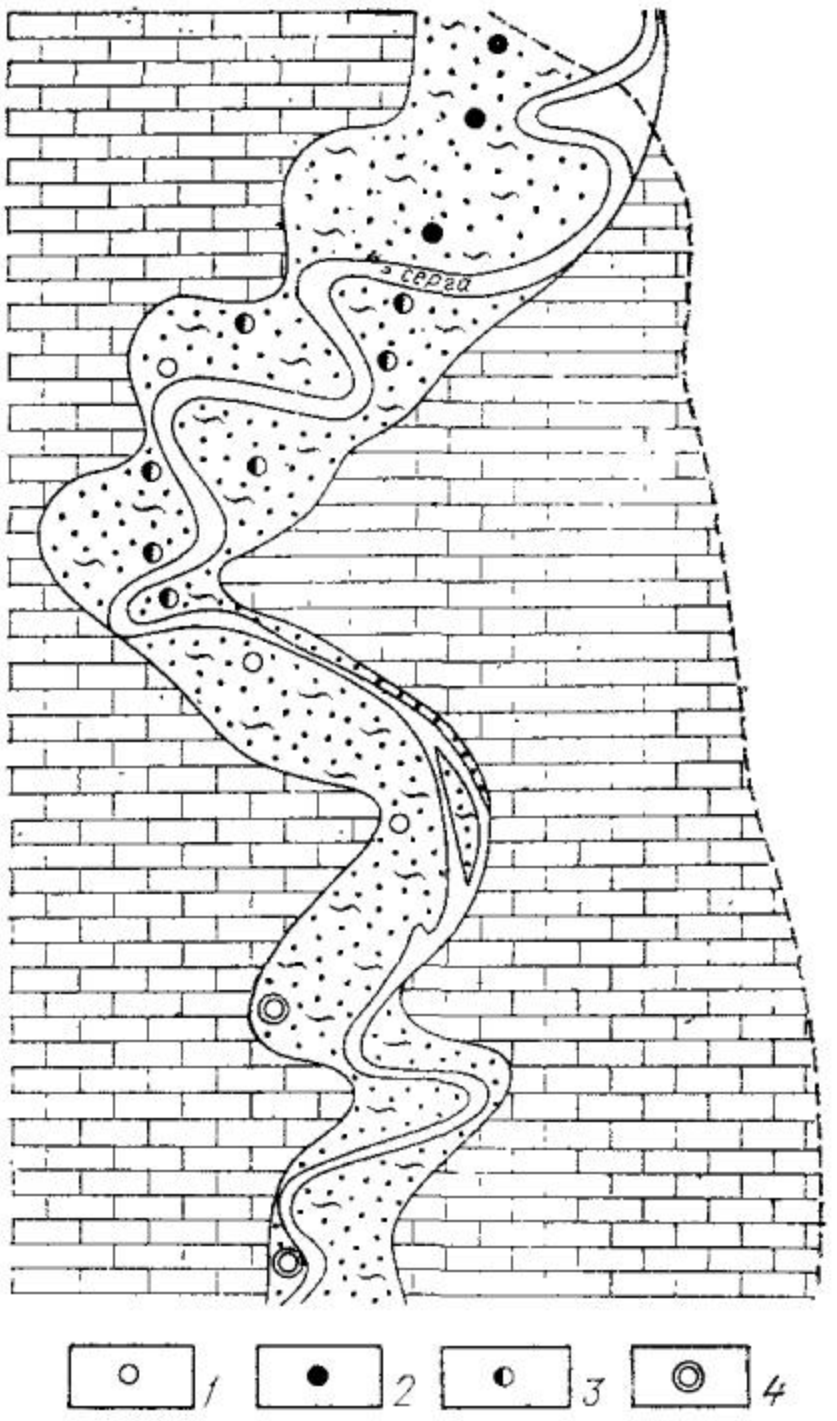


Рис. 62. Схема расположения скважин опытных кустов и эксплуатационных скважин проектируемого водозабора, рекомендованная на основании результатов моделирования.

1 — скважины опытных кустов при детальной разведке месторождения; *2* — скважины новой конструкции водозабора; *3* — то же, совпадающие с пробуренными ранее разведочно-эксплуатационными скважинами; *4* — дополнительные скважины новой конструкции водозабора, рекомендованные за пределами участка детальной разведки. Условные обозначения литологии см. на рис. 61

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАБОТ В СТАДИЮ ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКА ЗАПАСОВ

По результатам работ, выполненных в предыдущую стадию, были подсчитаны (гидродинамическим методом) эксплуатационные запасы подземных вод Сергинского месторождения в количестве 80 тыс. м³/сут и затем утверждены в ГКЗ СССР в основном по перспективной категории C_1. Эти запасы полностью не удовлетворяют заявленную потребность в воде. Перед детальной разведкой, таким образом, были поставлены задачи, во-первых, перевести разведанные запасы в промышленные категории А+В и затем выявить возможность прироста запасов до 139 тыс. м³/сут, что соответствует заявленной потребности

в воде. Сложность решения указанных гидрогеологических задач на Сергинском месторождении состоит в следующем. Как отмечалось ранее, основными источниками восполнения эксплуатационных запасов в требуемом количестве являются поверхностные воды р. Серги, имеющей меженный сток года 95 %-ной обеспеченности менее 1 м³/с. Осушение грунтовых вод аллювиальных отложений происходит в засушливый период (3 мес в году) с последующим восполнением в многоводный сезон (9 мес в году) из-за сравнительно невысоких водопроводящих свойств песчано-галечниковых отложений в вертикальном направлении оставался недостаточно обоснованным данными предварительной разведки. В связи с этим было принято решение обосновать проектирование работ в стадию детальной разведки, а также выполнить подсчет эксплуатационных запасов подземных вод с помощью метода математического моделирования на аналоговой машине.

Перед разведочным моделированием гидрогеологических условий месторождения, которое было выполнено в институте ВСЕГИНГЕО, на данном этапе исследований были поставлены следующие конкретные задачи:

а) уточнить фильтрационные параметры песчано-галечниковых отложений и водовмещающих известняков в области влияния проектируемого водозабора и в пределах их естественных границ распространения и выявить при этом фильтрационную неоднородность водоносных горизонтов по площади и в вертикальном разрезе;

б) определить степень гидравлической связи поверхностных вод реки с водоносным горизонтом карбонатных пород на площади разведочного участка;

в) установить емкостную характеристику аллювиальных отложений и оценить возможность регулирования стока р. Серги для обеспечения проектируемой производительности водозабора, превышающей меженный сток реки в 1,5 раза;

г) разработать методику проведения опытно-кустовых откачек и выбрать для этой цели места заложения опытных кустов, их количество, схему размещения наблюдательной сети скважин в плане и их положение в разрезе; обосновать продолжительность кустовых откачек и их производительность;

д) разработать рекомендации по уточнению конструкции и схемы размещения водозаборных скважин на разведочном участке.

Для месторождения были разработаны две системы электрических моделей, на которых производилось решение вначале обратных стационарных и нестационарных задач с использованием имеющейся гидрогеологической информации. По площади месторождения была составлена расчетная схема, отражающая основные элементы природных условий объекта.

Для составления модели Сергинского месторождения была использована следующая гидрогеологическая информация в

обобщенном виде: гидрогеологическая карта, отражающая условия распространения водоносных горизонтов, карты водопроводимости водоносного горизонта карбонатных пород, карты изомощностей аллювиальных песчано-галечниковых отложений, карты коэффициентов вертикально и горизонтально направленной фильтрации и коэффициентов водоотдачи аллювиальных отложений.

В качестве моделирующего устройства использовалась сеточная вычислительная машина УСМ-1. Модель, на которой решалась обратная стационарная задача, была составлена из элементов сопротивлений (*RR*-сетка), воспроизводящих водопроводимости известняков и аллювиальных отложений долины р. Серги. Оба эти слоя соединялись между собой сопротивлениями R_z, моделирующими гидравлическую взаимосвязь водоносных горизонтов. Границами водовмещающих известняков в плане являлись р. Демид на западе и линия их контакта с непроницаемыми сланцевыми породами на востоке. Северная и южная границы проходили по контурам разведанного участка вдоль р. Серги. На этих границах задавались условия постоянства расхода потока грунтовых вод аллювиальных отложений и трещинно-карстовых вод известняков в естественных условиях, вычисленные гидродинамическим расчетом. На реках Демид и Серга задавались условия неизменности уровня подземных вод, связанных с речными водами.

На указанной модели воспроизводился естественный установившийся средний многолетний режим подземных вод при условии равномерно распределенной по площади величины фильтрационного питания. В данной расчетной схеме осуществлялся подбор на модели таких значений коэффициентов водопроводимости известняков и аллювиальных отложений, при которых воспроизводилась бы карта гидроизогипс, составленная на основе натурных исследований.

Для решения обратной нестационарной задачи по воспроизведению опытных откачек, выполненных на стадии предварительной разведки из двух одиночных скважин, и кустовых откачек по пяти разведочным профилям была составлена модель из *RC*-элементов, моделирующих, как и в первом случае, двухслойную среду. При реализации на модели процесса проведения опытных кустовых откачек уточнялись главным образом емкостные характеристики водоносных пород.

На этом этапе моделировались также процессы проведения кустовых откачек большой производительности и предварительно опробовались схема и режим работы проектируемого водозабора по принятой схеме.

Моделирование на данном этапе подтвердило принципиальную возможность создания на месторождении водозабора с требуемой производительностью. Было также установлено, что для получения более достоверных параметров двух водоносных горизонтов (водопроводимости и емкости), более достоверной

оценки степени фильтрационной неоднородности, а также взаимосвязи поверхностных и подземных вод целесообразно на стадии детальной разведки выполнить на трех-четырех участках месторождения опытные кустовые откачки с общей производительностью примерно 250—300 л/с каждая. Длительность этих откачек определялась из условия формирования стационарных депрессионных воронок к концу опытных работ. По предварительным расчетам на модели продолжительность кустовой откачки оценивалась продолжительностью в 25—30 сут. Вся площадь месторождения исходя из изменения мощности аллювиальных отложений разбивалась на три подучастка: северный, где мощность песчано-галечниковых отложений достигает 50 м, центральный — до 25 м и южный — на котором мощность аллювиальных отложений изменяется от 10 до 15 м. На каждом из этих участков было решено выполнить опытные кустовые откачки на стадии детальной разведки. Проведение именно таких откачек определялось необходимостью исследовать процесс взаимосвязи поверхностных вод р. Серги с грунтовыми водами и затем связь с трещинно-карстовыми водами подстилающего водоносного горизонта. Такие откачки позволяют более полно и надежно исследовать параметры двух водоносных горизонтов, учитывая их весьма широкий диапазон изменений как в плане, так и в вертикальном направлении, что было установлено предварительным моделированием. Важным элементом этих откачек являлось наложение депрессионных воронок друг на друга в плане с охватом всей площади месторождения.

Наблюдательная сеть для этих откачек состояла из скважин, расположенных по продольному профилю реки и поперечным профилям на опытных кустах. Скважины были оборудованы в виде спаренных пьезометров раздельно на грунтовые и трещинно-карстовые воды известняков. Именно такая схема (рис. 63) и была реализована на стадии выполнения детальной разведки.

Результаты проведенных кустовых откачек в дальнейшем воспроизводились на двухслойных моделях УСМ-1. Методика их воспроизведения заключалась в следующем. Вначале на *RR*-сетках воспроизводился установившийся режим фильтрации сформировавшихся на опытных участках депрессионных воронок. При этом исходные фильтрационные параметры для расчета этой модели были приняты по результатам моделирования естественного процесса фильтрации подземных вод на месторождении исходя из результатов предварительной разведки. При моделировании установившихся депрессионных воронок все фильтрационные параметры (коэффициент фильтрации аллювиальных отложений в плане, значение коэффициента фильтрации аллювиальных отложений по вертикали и коэффициент фильтрации водоносных известняков) подвергались окончательной корректировке.

В дальнейшем на *RC*-сеточной модели воспроизводился неустановившийся процесс формирования воронок депрессии на

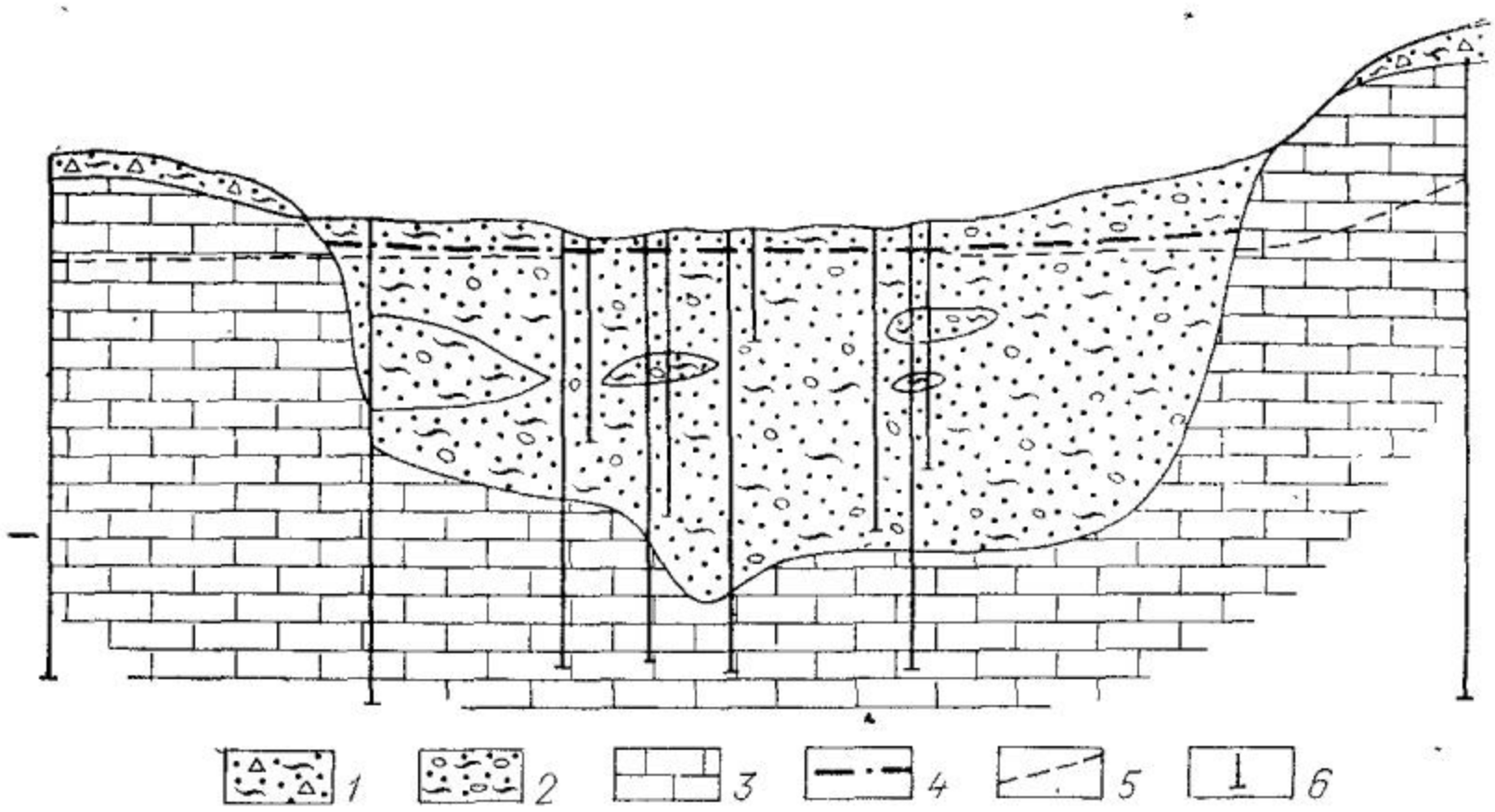


Рис. 63. Схематический геолого-гидрогеологический разрез долины р. Серги.
1 — делювиальные отложения суглинистого состава; *2* — песчано-глинистые аллювиальные отложения с гравием; *3* — девонские известняки рифогенные; *4* — уровень аллювиальных подземных вод; *5* — уровень подземных вод в известняках; *6* — скважина

каждом опытном участке с целью подбора емкостных характеристик аллювиальных рыхлых образований (μ-гравитационное) и известняков (μ^* — коэффициент упругой емкости).

Критерием правильности полученных решений на модели служило совпадение темпов и абсолютных значений понижений уровня подземных вод в аллювиальном и известняковом горизонтах по всем наблюдательным и центральным скважинам опытных кустов.

На основе результатов моделирования процессов, протекающих при опытных кустовых откачках, была создана в окончательном виде расчетная схема Сергинского месторождения подземных вод и соответствующая ей электрическая модель, включающая внешние природные границы водоносных горизонтов (литологические границы и речные системы), параметры проницаемости и емкости водосодержащих пород. Принципиальная структура сеточной модели Сергинского месторождения показана в виде разреза на рис. 64.

Второй этап разведочного моделирования заключался в прогнозном решении задач собственно по оценке возможных эксплуатационных запасов Сергинского месторождения и разработке наиболее рациональной схемы размещения будущего водозаборного сооружения.

С этой целью на сеточной *RC*-модели были выполнены следующие варианты решений задач.

1. Расчет производительности водозаборного сооружения, равного меженному расходу р. Серги, т. е. исследовался процесс режима работы водозаборных скважин при постоянно действующем водотоке в реке с шириной русла в межень.

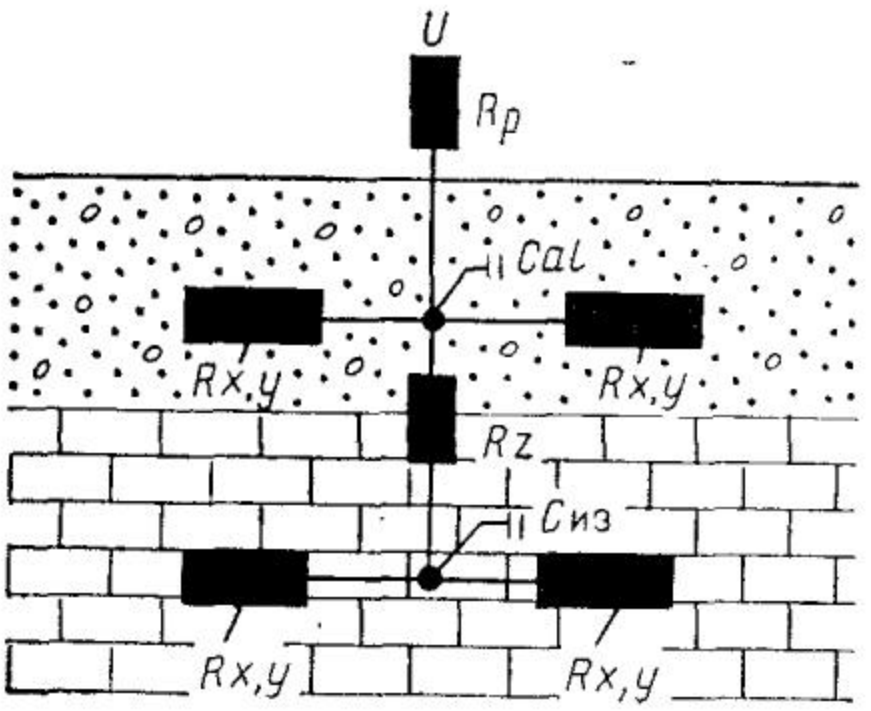


Рис. 64. Электрическая схема двухслойной модели Сергинского месторождения подземных вод, принятая при моделировании.

$R_{x,y}$ — электрическое сопротивление, моделирующее водопроводимость аллювиальных отложений и подстилающих известняков; R_z — электрическое сопротивление по оси z, моделирующее взаимодействие аллювиального и известнякового водоносных горизонтов; R_p — электрическое сопротивление, через которое задается граничное условие на реке; C — электрическая емкость — аналог коэффициентов гравитационной емкости аллювиальных песчано-галечниковых C_a отложений и упругой емкости закарстованных известняков $C_{из}$; U — сила тока

2. Расчет производительности водозаборного сооружения с максимально возможным его дебитом в пределах участка детальной разведки. В этом случае исследовался процесс режима работы водозабора при периодическом поглощении речного стока, осушении аллювиального водоносного горизонта в межень и восполнении запасов подземных вод в аллювиальных образованиях в полноводный период года, т. е. возобновлении речного стока с момента наступления паводка. При решении прогнозной задачи изучали подвариант, когда маловодные годы в режиме поверхностного стока р. Серги повторялись в течение трех лет.

3. Производилась серия расчетов для обоснования на разведочном участке оптимальной схемы расположения водозаборных скважин и режима их эксплуатации при удовлетворении заявленной потребности в воде — около 1,5 м^3/с. При этом граничные условия на р. Серге задавались в соответствии с реальными данными гидрографа реки, т. е. в межень (январь, февраль, март) моделировался процесс осушения русловой части реки в паводок длительностью порядка 15 сут, воспроизводился процесс возобновления поверхностного стока и запасов подземных вод и в дальнейший период, до конца года, воспроизводился режим стока реки, характерный для послепаводкового периода по средним многолетним наблюдениям.

Следует отметить, что реализация такой сложной расчетной схемы на модели была осуществлена впервые в практике гидрогеологических расчетов в нашей стране и получила высокую оценку ГКЗ при рассмотрении результатов разведки описываемого объекта.

В результате проведения разведочного этапа моделирования Сергинского месторождения помимо разработки оптимальной схемы расположения эксплуатационных скважин был рекомендован режим водоотбора из каптажных сооружений и показана динамика процесса сработки запасов подземных вод и их восполнения (рис. 65), а также был рассчитан баланс эксплуатационных запасов подземных вод на меженный и полноводный периоды года.

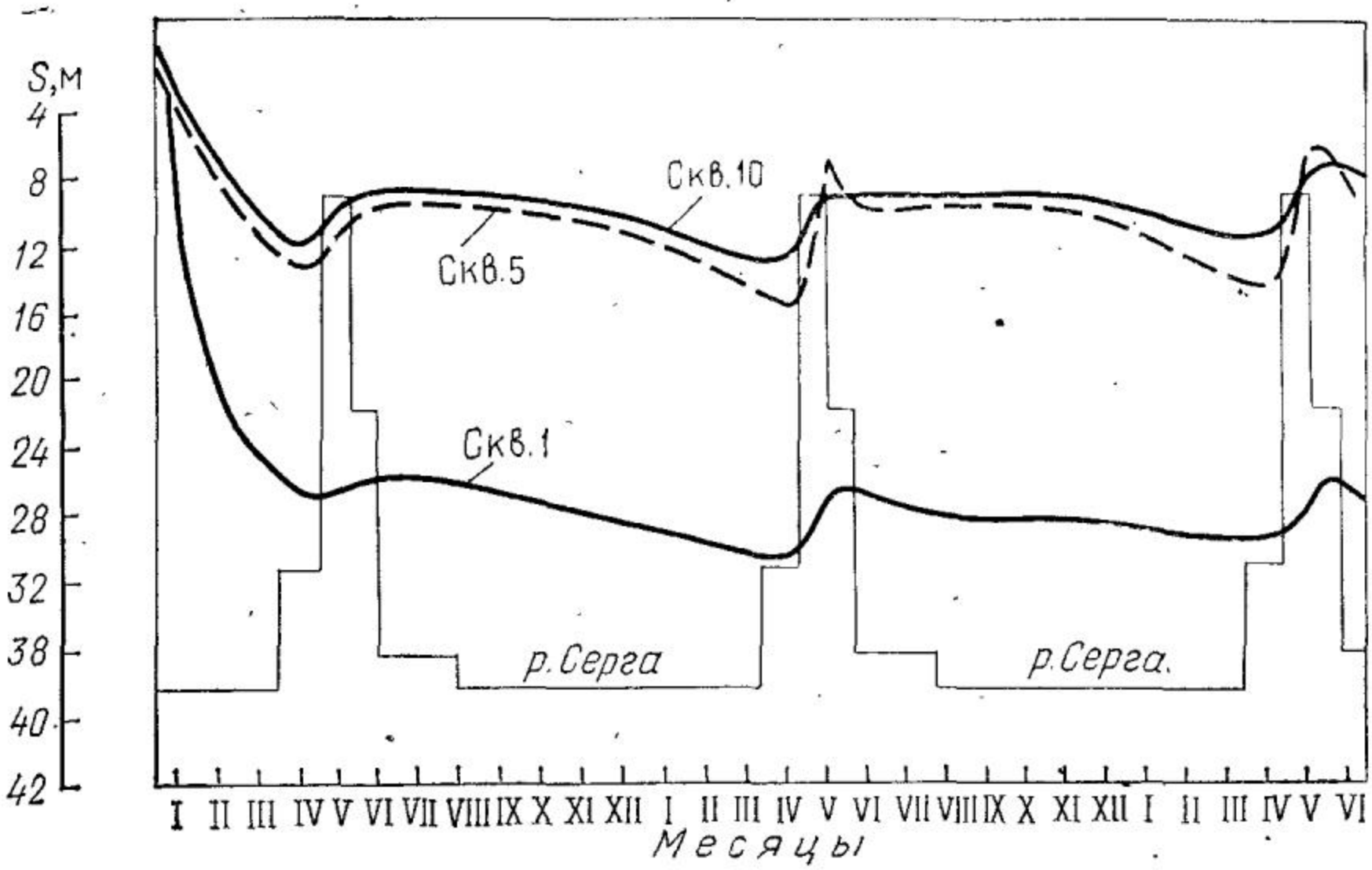


Рис. 65. Графики изменеиия уровня воды в р. Серге и в эксплуатационных скважинах проектируемого водозабора

Таким образом, применение метода математического моделирования, в частности с использованием аналоговой сеточной вычислительной машины УСМ-1, по результатам предварительной разведки позволило существенно уточнить методику и объем гидрогеологических работ на стадии детальной разведки месторождения.

Результаты исследований на модели были положены в основу методики детальной разведки Сергинского месторождения. По существу, в натурных условиях были выполнены все виды гидрогеологических работ, как было установлено в процессе моделирования.

Результаты детальной разведки послужили основой для окончательной оценки эксплуатационных запасов подземных вод, которая была выполнена также методом моделирования.

В эту стадию была принята следующая программа моделирования:

а) решение методических задач для отработки способов моделирования фильтрационного потока в сложных геолого-структурных, гидрогеологических и гидрологических условиях Сергинского месторождения;

б) уточнение гидрогеологических параметров водоносных пород для более обоснованной схемы электрической модели на участке будущего водозабора; с этой целью решались обратные задачи по воспроизведению режима трех кустовых откачек, выполненных в стадию детальной разведки;

в) прогнозная оценка эксплуатационных запасов Сергинского месторождения с учетом конкретной схемы расположения скважин на водозаборном сооружении первой и второй очереди.

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод на модели осуществлялась в следующих вариантах:

а) расчет производительности водозаборного сооружения, равный заявленной потребности первой очереди. Для решения этой задачи подбор дебитов и схемы расположения эксплуатационных скважин проводился с учетом фактически пробуренных на водозаборном участке имеющихся разведочных выработок;

б) расчет производительности водозаборного сооружения с максимально возможным гарантированным дебитом скважин (по той же схеме их расположения);

в) расчет производительности водозабора с учетом заявленного водопотребления второй очереди водоснабжения объекта.

В перечисленных задачах моделировался процесс периодического осушения поверхностного стока реки в меженный период при расходах, соответствующих 95 %-ной обеспеченности стока, а также частичное осушение водоносных горизонтов с последующим возобновлением сработанных запасов в паводковый период.

В меженный период (период частичной сработки естественных запасов) эксплуатационные запасы на водозаборном участке будут формироваться за счет следующих источников: естественных запасов грунтовых вод аллювиальных отложений, естественных запасов трещинно-карстовых вод известняков, за счет инфильтрации поверхностных вод.

В паводковое время, когда величина питания из р. Серги будет значительно превышать суммарный дебит водозабора, эксплуатационные запасы будут формироваться преимущественно за счет привлекаемых и естественных ресурсов.

На основании проведенных работ в стадию детальной разведки и исследований с помощью математического моделирования на ЭВМ была доказана возможность отбора подземных вод на Сергинском месторождении в количестве 128,6 тыс. $м^3$/сут. Эти запасы были отнесены к сумме категорий А и В. Таким образом, по результатам комплексных исследований была доказана возможность строительства и эксплуатации на месторождении водозаборного сооружения с заданной производительностью 1500 л/с, что полностью отвечает заявленной потребности в воде; изучена структура эксплуатационных запасов подземных вод и оценены различные источники их формирования.

Глава 22

РАЗВЕДКА И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД САРЫ-БУЛУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕСТОРОЖДЕНИИ

Месторождение пресных подземных вод Сары-Булун расположено в пределах слаботеррасированного внутридолинного конуса выноса р. Чу, образованного ею при выходе из теснин Киргизского хребта в равнинную часть Иссык-Кульской впадины (рис. 66). По условиям формирования оно относится к первому типу приведенной ранее классификации (см. табл. 4), подтипу «б» — месторождения в узких речных долинах, где грунтовые воды песчано-галечниковых аллювиально-пролювиальных отложений непосредственно связаны с поверхностными водами реки, с периодическим отсутствием стока.

По сложности гидрогеологических условий для целей разведки месторождение относится к первой группе.

В геологическом строении месторождения принимают участие хорошо промытые валунно-галечниковые с песчано-гравийным заполнителем образования четвертичного возраста, которые подстилаются слабосцементированными рыхлыми породами неогенового возраста. К аллювиально-пролювиальным образованиям приурочен безнапорный горизонт грунтовых вод мощностью 70—80 м в центральной части конуса выноса (рис. 67). По площади месторождения мощность водоносного горизонта изменяется от 30—40 до 100 м.

Формирование подземных вод в аллювиальных образованиях на месторождении происходит преимущественно за счет инфильтрационных потерь поверхностных вод р. Чу. По направлению с юга на север месторождения происходит постепенное снижение глубины залегания уровня подземных вод с 10—12 м до 0 м.

На участке резкого поворота реки на западе четко фиксируется зона естественной разгрузки подземных вод с суммарным средним расходом 700—800 л/с в зимнюю межень.

Данные разведочного бурения и опытно-фильтрационных работ показали, что водовмещающие песчано-галечниковые отложения обладают хорошими фильтрационными свойствами. Разведочные скважины, как правило, имеют высокую производительность почти по всей площади месторождения. Максимальные значения удельных дебитов разведочных скважин были выявлены в центральной части месторождения. Водопроводимость продуктивного горизонта в центральной части месторождения составляет 10 000 $м^2$/сут, уменьшаясь в краевых частях до нескольких тысяч метров кубических в сутки.

Режим питания подземных вод на месторождении резко нарушен в связи с водохозяйственной деятельностью (зарегулиро-

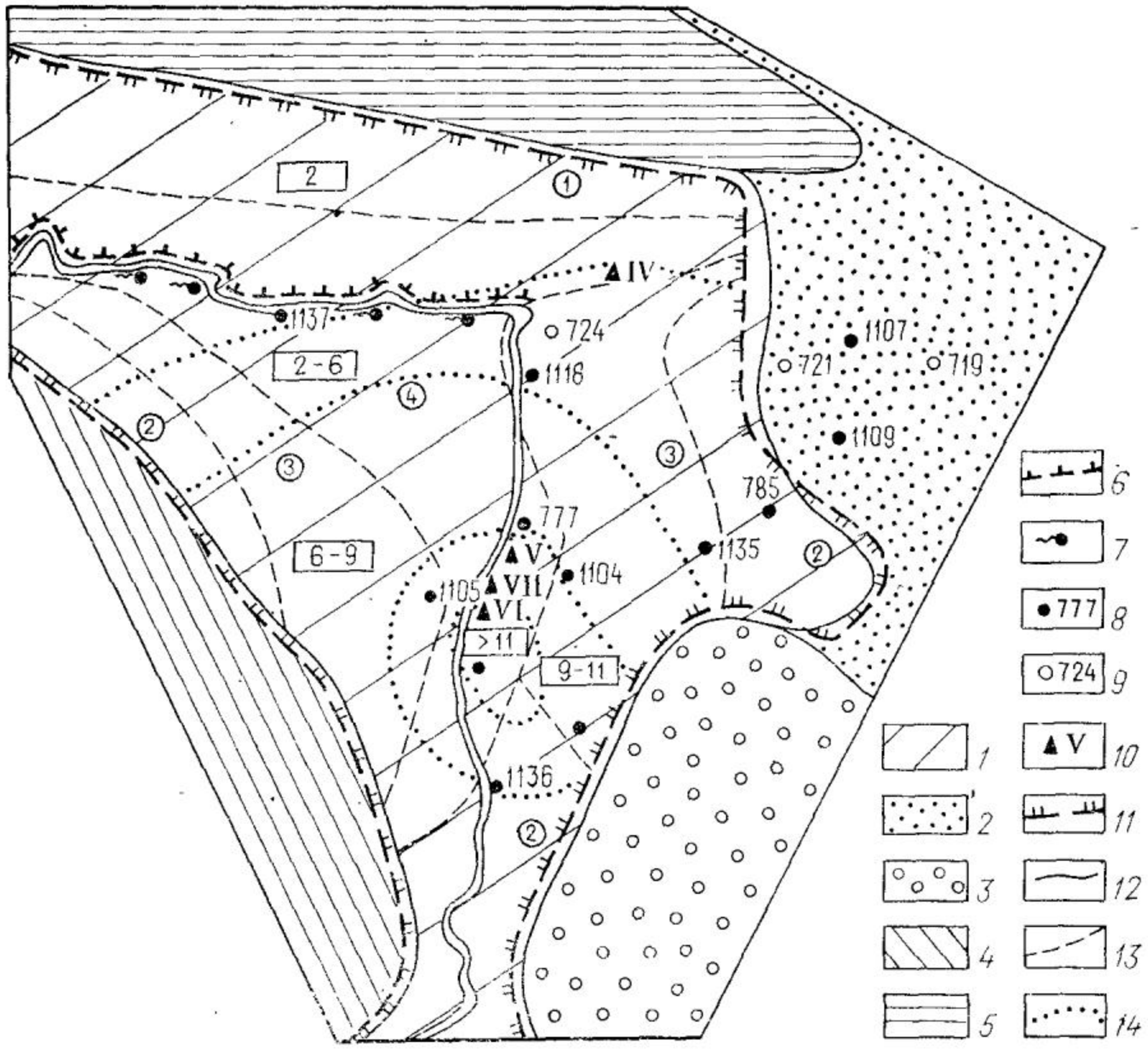


Рис. 66. Схематическая карта месторождения подземных вод Сары-Булун.

1 — водоносный горизонт верхнечетвертичных современных аллювиально-пролювиальных отложений; *2* — водоносный горизонт среднечетвертичных современных пролювиальных отложений; *3* — водоносный комплекс неогеновых отложений; *4* — подземные воды зоны открытой трещиноватости образований палеозоя и протерозоя; *5* — практически водоупорные глинистые отложения верхнего неогена; *6* — выклинивание подземных вод в русле р. Чу; *7* — родники; *8* — разведочная скважина и ее номер; *9* — наблюдательная скважина и ее номер; *10* — куст скважин и его номер; *11—14* — границы: *11* — месторождения; *12* — стратиграфические; *13* — зон с различной водопроводимостью пласта, *14* — зон с различными амплитудами подземных вод
Цифры в кружках — зоны с различной водопроводимостью пласта ($м^2$/сут): 1—500; 2 — 3000; 3 — 7000; 4 — 10000. Цифры в прямоугольниках — амплитуды уровней подземных вод в метрах

вание стока на Орто-Токойском водохранилище). В связи с этим во внутригодовом разрезе питание подземных вод на объекте будет происходить в различных условиях: а) в стоковый период (во время попусков воды из водохранилища) — за счет инфильтрации поверхностных вод из реки, примерно 5—6 мес в году; б) в бесстоковый период (6—7 мес в году) питание фактически будет отсутствовать, если пренебречь питанием за счет инфильтрации выпадающих атмосферных осадков. В этот период (по существу, период независимого режима) будет происходить сработка емкостных запасов подземных вод с последующим восполнением в стоковый период. Годовая

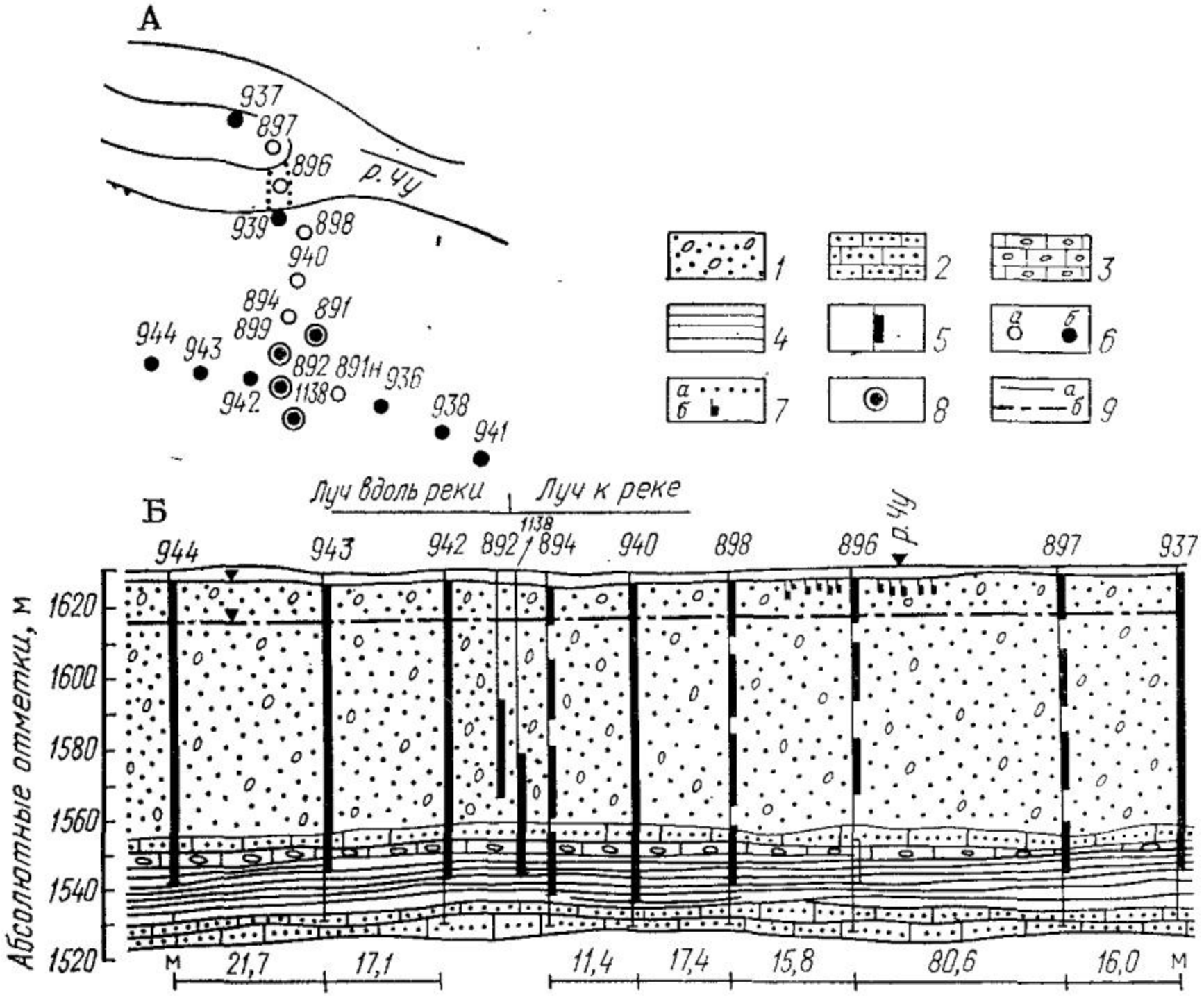


Рис. 67. Схема опытного куста V в долине р. Чу (А) и геолого-гидрогеологический разрез участка опробования (Б).

1 — валунно-галечные отложения; *2* — песчаник; *3* — конгломерат; *4* — глина; *5* — положение фильтра в наблюдательной скважине; *6* — наблюдательные скважины: *а* — оборудованные ярусными пьезометрами; *б* — совершенные; *7* — забивные пьезометры: *а* — на плане, *б* — на разрезе; *8* — опытные скважины; *9* — уровни подземных вод: *а* — в стоковый период, *б* — в бесстоковый период

амплитуда колебания уровня грунтовых вод в прирусловой части реки достигает 10 м и более, уменьшаясь до 1 м вблизи участка естественной разгрузки.

Поисково-разведочные работы на месторождении выполнялись с целью изыскания источника хозяйственно-питьевого водоснабжения города. Участок под разведку был выбран вблизи города — всего в 5 км. Заявленная потребность в воде составляет 800—850 *л/с* с учетом перспектив.

На первом этапе поисков по результатам предварительных расчетов было установлено, что удовлетворить заявленную потребность в воде на Сары-Булунском месторождении можно путем строительства водозабора в виде линейного ряда скважин, расположенных вдоль реки Чу, общей протяженностью 2 км. При этом водозаборное сооружение по условиям питания будет работать на двух режимах:

а) в период попусков воды из Орто-Токойского водохранилища — за счет береговой инфильтрации поверхностных вод;

б) в бессточный период независимого режима — за счет сработки емкостных запасов подземных вод песчано-галечниковых образований с последующим их возобновлением в период попусков.

В связи с простыми условиями формирования подземных вод на месторождении результаты выполненных поисковых работ позволили перейти к стадии разведки объекта.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕННЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Исходя из гидрогеологических особенностей месторождения перед разведкой были поставлены следующие задачи.

1. Изучение изменения по площади месторождения мощности и фильтрационных свойств песчано-галечниковых аллювиальных отложений в долине р. Чу в пределах участков будущего водозаборного сооружения. Именно в этих образованиях формируются емкостные запасы подземных вод, которые определяют условия работы будущего водозабора в период, когда в реке отсутствует сток. В связи с этим важно было изучить границы распространения аллювиально-пролювиальных отложений р. Чу, обладающих высокими фильтрационными свойствами и определяющих по существу собственно границы месторождения Сары-Булун.

2. Изучение в вертикальном разрезе фильтрационных свойств продуктивного горизонта в связи с большой амплитудой колебания подземных вод (10—12 м) и предполагаемым увеличением в годовом разрезе величины понижения их уровня на участке будущего водозабора примерно на 30—40 м.

3. Определение гидрогеологических параметров продуктивного горизонта на участке проектируемого водозабора: коэффициента проводимости, уровнепроводности и водоотдачи, вертикального и горизонтального коэффициентов фильтрации, величины эффективной мощности горизонта.

4. Определение на разведочном участке фильтрационного сопротивления заиленного слоя русла реки (параметр A_0) и изменения этого параметра по глубине подрусловых отложений, а также изучение условий кольматации и декольматации русловых отложений р. Чу с целью выявления степени береговой инфильтрации поверхностных вод реки в период работы водозаборного сооружения.

5. Изучение техногенного режима подземных вод на разведочном участке, в том числе годовой амплитуды колебания их уровня, формирующегося под влиянием периодических попусков поверхностных вод со стороны Орто-Токойского водохранилища.

6. Изучение качества подземных вод.

Для решения перечисленных выше задач на месторождении были выполнены следующие работы.

1. Наземные площадные геофизические исследования по профилям методами: ВЭЗ и ВП (вертикальных электрических

зондирований и вызванной поляризации) — для картирования границ распространения продуктивного водоносного горизонта и определения изменения по его площади мощности и фильтрационных свойств; сейсморазведки — для картирования глубины залегания уровня грунтовых вод по всей площади месторождения. Эти исследования позволили совместно с данными буровых и опытно-фильтрационных работ построить карту водопроводимости водоносного горизонта по площади месторождения и оценить его емкостные запасы.

2. Бурение разведочных, разведочно-эксплуатационных и наблюдательных гидрогеологических скважин по опорным профилям и в опытных кустах (см. рис. 66). Принципы размещения скважин по площади определялись необходимостью решения следующих задач: получения параметрических данных для увязки результатов геофизических, буровых и опытно-фильтрационных работ; относительно равномерного изучения по площади мощности и фильтрационных свойств водовмещающих пород; детального изучения гидрогеологических параметров водоносного горизонта и параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод на участке проектируемого водозабора; изучения режима уровней на различных участках месторождения на различном удалении от реки. Для решения перечисленных задач скважины были размещены по одному продольному (вдоль линии водозабора и русла реки и от головной части конуса выноса до поднятия на конусе Калмыксу) выносу, трем поперечным широтным профилям, проходящим через все месторождение, и одному широтному разведочному профилю севернее месторождения. Скважины располагались по более редкой сети на профилях в периферийных частях месторождения с их сгущением в центральной части. Такое расположение скважин позволило провести опробование продуктивного водоносного горизонта по всей площади месторождения по относительно редкой сети скважин и детальное в опытных кустах на участке проектируемого водозабора.

Опытные кусты располагались в схеме проектируемого водозабора на участках с различным характером кольматации русловых отложений. Последний определялся визуально путем проведения специальной топографической съемки русла в период отсутствия стока в реке. Участки интенсивной кольматации фиксировались по наблюдаемой глинистой пленке толщиной 2—3 мм, непосредственно плащеобразно покрывающей валунно-галечниковые отложения на отдельных участках русла. На других участках такой глинистой пленки не наблюдалось.

Кроме того, в северной части месторождения был разбурен опытный куст IV для определения гидрогеологических параметров пласта в зоне сочленения аллювиальных отложений р. Чу и примыкающих отложений конуса выноса Калмаксу.

3. Опытно-фильтрационные работы на разведочных и разведочно-эксплуатационных скважинах для определения гидрогео-

логических параметров продуктивного водоносного горизонта и их изменения по площади и в разрезе. Эти работы проводились для получения опорных данных для расчета производительности водозабора и восполнения сработанных запасов за счет инфильтрации поверхностных вод.

По всей площади месторождения были выполнены преимущественно откачки из одиночных скважин, а на участке водозабора — кустовые откачки. Такое распределение по площади объемов и видов опытных откачек определялось следующими факторами: 1. В бесстоковый период, когда будет просходить сработка емкостных запасов грунтовых вод, сформируется обширная и глубокая воронка депрессии по всей площади месторождения, в этот период определяющее значение в формировании эксплуатационных понижений уровня имеет водоотдача пород, а водопроводимость имеет подчиненное значение. Поскольку водоотдача пород меняется мало, фильтрационные свойства пород на площади месторождения могут быть определены приближенно по данным одиночных откачек, так как важна не столько детализация значений параметров в отдельных точках, сколько их относительно равномерная характеристика по площади. 2. В стоковый период формирование эксплуатационных понижений уровня будет определяться гидрогеологическими параметрами пласта на участке водозабора и фильтрационным сопротивлением русловых отложений реки, поэтому необходимо было изучить детальное определение этих параметров по результатам специальных кустовых откачек. С этой целью в центральной части участка водозабора был сооружен и опробован опорный специализированный ярусный трехлучевой куст V (см. рис. 67). Кроме того, в пределах проектируемого водозаборного ряда были разбурены и опробованы три вспомогательных однолучевых опытных куста V, VI, VII и скважина 777, изучены изменения фильтрационного сопротивления русловых отложений реки вдоль линии водозабора.

4. Детальное изучение нарушенного режима подземных вод с целью установления закономерности его формирования во внутригодовом цикле, определение годовой амплитуды колебания, а также наблюдения за сработкой емкостных запасов и их восстановлением в период попусков поверхностных вод со стороны Орто-Токойского водохранилища, в том числе детальное изучение режима родникового стока в зоне его естественной разгрузки.

5. Детальное качественное опробование подземных и поверхностных вод.

Все основные виды геофизических и гидрогеологических работ выполнялись по обычной традиционно сложившейся методике, за исключением некоторых особенностей технологии оборудования наблюдательных буровых скважин ярусными пьезометрами, а также проведения опытных кустовых откачек специального назначения. В связи с этим целесообразно кратко

охарактеризовать методические приемы выполнения данных видов работ.

Опытный опорный куст состоял из разведочных скважин совершенного типа и наблюдательных скважин, в том числе пройденных непосредственно в современном русле реки, с целью изучения условий кольматации и фильтрационного сопротивления русла реки.

На площади опытного куста, состоящего из трех лучей наблюдательных скважин, были пробурены четыре разведочные скважины. Каждый поперечный луч состоял из совершенных и ярусно расположенных несовершенных наблюдательных пьезометров. Совершенного типа наблюдательные скважины предназначались для определения по данным опытных откачек водопроводимости и водоотдачи пласта, а ярусно расположенные пьезометры несовершенного типа — коэффициента фильтрации водоносных пород в вертикальном направлении, а также фильтрационного сопротивления подрусловых отложений.

Кроме того, для определения фильтрационного сопротивления русловых отложений реки и его изменения по глубине непосредственно в русле реки в поперечном его сечении был оборудован куст наблюдательных скважин, состоящий из шести забивных фильтров, заложенных на глубины 0,5—1,0 м. Наблюдения за уровнями русловых пьезометров во время опытных откачек производились с помощью специально построенного мостика.

Количественное опробование продуктивного водоносного горизонта на опытном кусте скважин проводилось в несколько этапов — в период, когда действовал сток в р. Чу, и в бессточный период. Повторяемость опытных откачек связана с тем, что в бессточный период нельзя определить фильтрационное сопротивление русловых отложений, а при наличии стока в реке — водоотдачу пород. Основные данные по опытным кустовым откачкам приводятся в табл. 26.

По результатам выполненных откачек в бессточный период были определены основные гидрогеологические параметры водоносных пород (водопроводимость, пьезопроводность и водоотдача) графоаналитическим методом временного прослеживания уровня (графики $S - \lg t$), площадного прослеживания (графики $S - \lg r$) и комбинированного прослеживания (графики $S - \lg(t/r^2)$) (рис. 68).

Во время проведения опытных откачек в период отсутствия стока в реке наблюдалось общее снижение уровня подземных вод, зафиксированное в наблюдательных скважинах вне площади влияния откачек. Этот спад уровня составил в среднем по площади месторождения (за время проведения опыта) 0,19 м. В связи с этим при построении графиков откачек в величины понижения уровней вводились соответствующие поправки.

Расчеты гидрогеологических параметров пласта были выполнены по общепринятой методике (см. гл. 12). Среднее значение

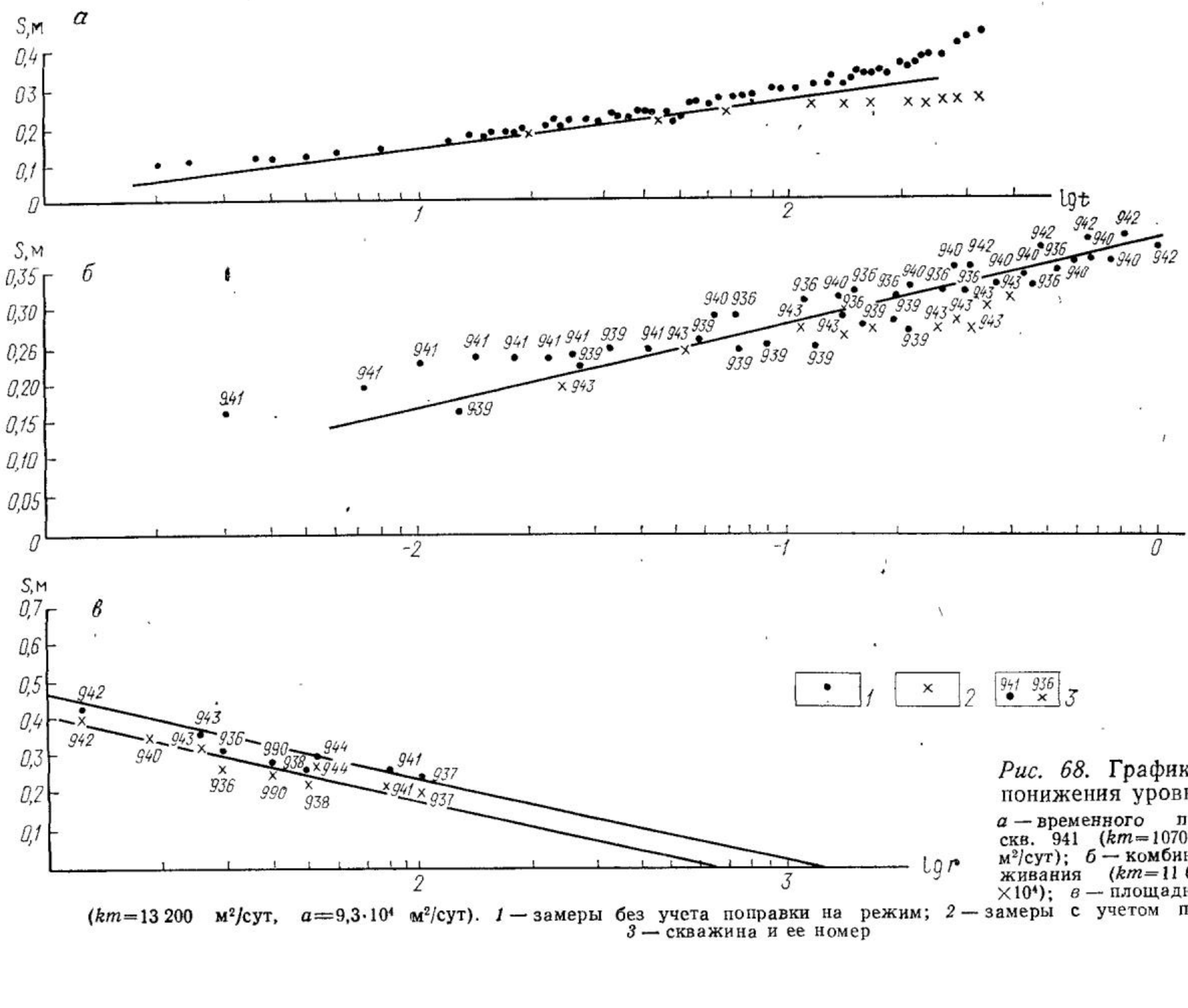


Рис. 68. График прослеживания понижения уровня воды:

а — временного прослеживания для скв. 941 (km=10700 м²/сут, a=5,3·10⁴ м²/сут); *б* — комбинированного прослеживания (km=11 600 м²/сут, a=5,1××10⁴); *в* — площадного прослеживания (km=13 200 м²/сут, a=9,3·10⁴ м²/сут). *1* — замеры без учета поправки на режим; *2* — замеры с учетом поправки на режим; *3* — скважина и ее номер

Таблица 26. Гидрогеологические данные по кустовым откачкам, проведенные на опытном опорном участке V

Номер опытной буровой скважины	Водовмещающие породы	Дата проведения опыта	Сток в реке	Среднее понижение уровня в скважинах при откачках, м	Суммарный дебит, м³/с
891, 893	Песчано-галечниковые аллювиальные образования	22.IX 1978 г.— 29.IX 1978 г.	Есть	2,3—2,9	120,3
891, 893	То же	22.III 1979 г.— 5.IV 1979 г.	Нет	2,0—1,75	880
891, 892, 893, 1138	»	1.VIII 1979 г.— 15.VIII 1979 г.	Есть	4,0—5,5	256,0

Примечание. Глубина залегания уровня воды 1,2 м.

гидрогеологических параметров на площади опорного опытного куста для условий бессточного периода, рассчитанных по различным способам обработки графиков, приводятся в табл. 27.

Таблица 27. Средние значения гидрогеологических параметров песчано-галечниковых водоносных пород

Обработка данных опытных откачек по графику прослеживания уровня	Водопроводимость, м²/сут	Уровнепроводность, м²/сут	Водоотдача
Временного	12,0	$5{,}2 \cdot 10^4$	0,23
Площадного	13,2	$9{,}3 \cdot 10^4$	0,14
Комбинированного	11,6	$5{,}1 \cdot 10^4$	0,23

В отличие от периода независимого режима режим динамического уровня во время опытных откачек в стоковый период очень быстро стабилизировался. Расчеты параметров производились по методу площадного прослеживания уровня в наблюдательных скважинах совершенного типа (рис. 69). При этом два периода проведения опытных откачек объясняются режимом уровня и стока воды

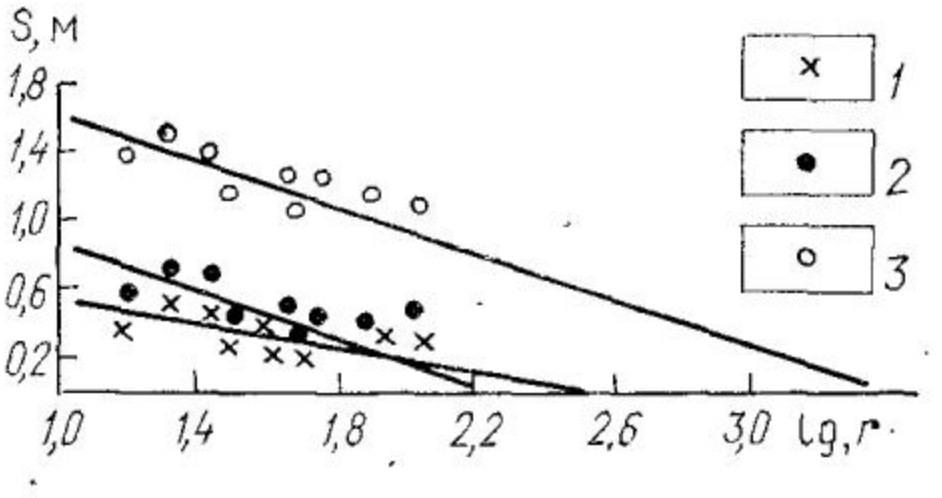


Рис. 69. Графики площадного прослеживания понижения уровня воды по кусту V в стоковый период (совершенные скважины).

1—3 — понижения уровня при откачках из скважин: *1* — в меженный период; *2* — при максимальном уровне воды в р. Чу; *3* — при минимальном уровне воды в р. Чу

в реке и соответствуют их максимальным и минимальным величинам. По данным опытных откачек, проведенных в стоковый период, определялась проводимость пласта, а также параметры, характеризующие фильтрационное сопротивление русловых отложений ΔL, и условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод A_0.

Результаты расчета указанных параметров приводятся в табл. 28.

Таблица 28

Номер опытной скважины	Уровень воды в реке	Водопроводимость, м²/сут	ΔL_0, м	A_0, сут
891, 892, 893, 1138	Максимальный	12 300	47	0,09
891, 892, 893, 1138	Минимальный	12 700	1540	3,16

Параметры A_0 и ΔL_0, как видно из таблицы, значительно отличаются. Это может быть объяснено резкой изменчивостью проницаемости донных и бортовых частей пород, слагающих современное русло реки, что четко может проявляться при подъеме и спаде уровня воды в реке.

Для сравнения с результатами обработки откачек методом площадного прослеживания уровня был выполнен расчет параметра ΔL по формуле Форхгеймера:

$$S = \frac{0{,}366Q}{km} \lg\left[\frac{(L + \Delta L) - r_1}{r_1}\right], \qquad (22.1)$$

где Q — дебит опытной скважины; L — расстояние опытной скважины до реки: r_1 — расстояние от расчетной (наблюдательной) скважины до опытной скважины; ΔL — параметр несовершенства русла.

Для расчета были использованы данные по совершенной наблюдательной скв. 939 на урезе реки и несовершенному верхнему пьезометру скв. 898, установленному непосредственно в русле реки.

При значении водопроводимости пласта 16 000 м²/сут и L = 45 м были получены значения параметра ΔL и A_0, приведенные в табл. 29.

По описанной выше методике были выполнены опытно-фильтрационные работы на кустах IV, VI и VII (см. рис. 66), которые были расположены по трассе будущего водозабора. На этих опытных участках были получены значения параметров ΔL от 60 до 450 м, а A_0 — от 0,11 до 0,47 сут.

С целью уточнения степени достоверности аналитических расчетов определения гидрогеологических параметров ΔL и A_0

и выявления зависимости значений этих параметров от величины попусков и поверхностных вод и уровня воды в реке на аналоговой машине УСМ-1 было выполнено моделирование процесса опытных кустовых откачек. Методика моделирования результатов опытных кустовых откачек на объемной четырехсеточной модели изложена в работах [12, 18].

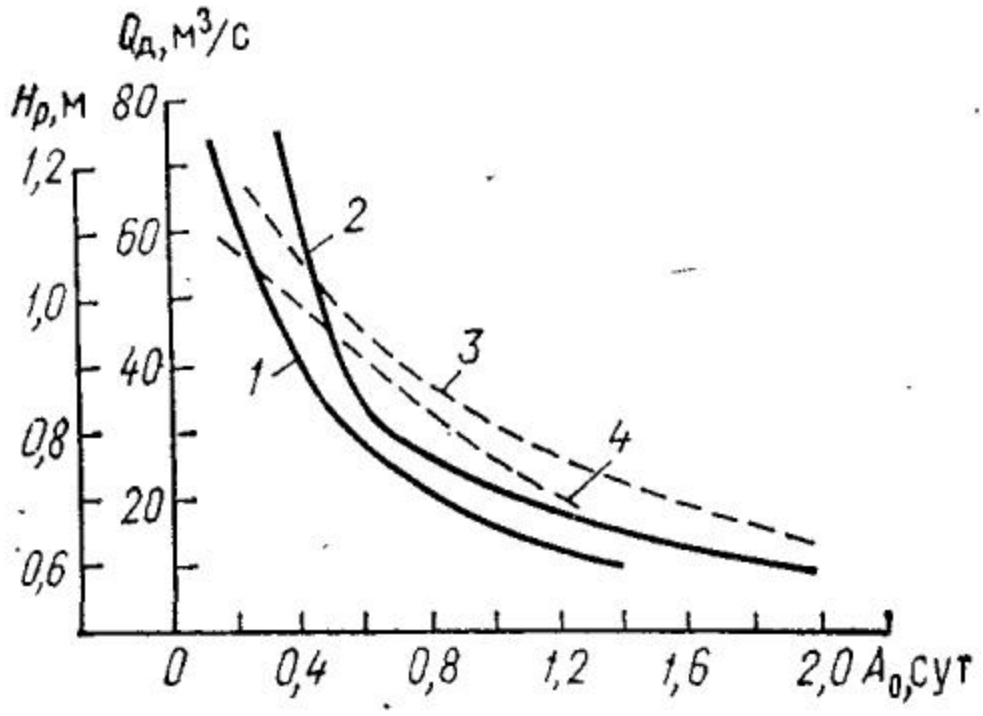


Рис. 70. Графики зависимости параметра A_0 от величины попусков и глубины реки по данным моделирования опытных откачек из куста V:
1 — $A_{0_{0,5м}} - f(Q_0)$; *2* — $A_{0_{сум}} - f(Q_0)$; *3* — $A_{0_{сум}} - f(H_0)$; *4* — $A_{0_{0,5м}} - f(H_0)$

Исследования на модели были выполнены по кустовым откачкам на опорном участке V. По результатам моделирования был составлен график зависимости значений параметра A_0 от расхода попусков и режима уровня в реке, представленный на рис. 70. Необходимо при этом отметить, что для обоих интервалов глубины поверхностного потока графики близки между собой.

Таблица 29. Результаты расчета параметров

Номер скважины	r_1, м	S, м	ΔL, м	A_0, сут
898	37,5	0,25	60	0,14
939	43,3	0,27	89	0,22

Исследования по результатам опытных работ показали, что на всем фронте водозаборного сооружения расчетные параметры ΔL и A_0 изменяются по площади, что свидетельствует об изменчивости степени кольматации русловых отложений реки. Наибольшая кольматация галечников отмечается до глубины 0,5 м, ниже кольматация резко затухает. При этом параметр, характеризующий гидравлическое сопротивление русловых отложений реки изменяется нелинейно, в зависимости от режима уровня воды в р. Чу в стоковый период. Наиболее проницаемая часть русловых отложений приходится на борта современного русла. Следовательно, зависимость сопротивления русловых отложений от уровня воды в реке следует учитывать при оценке пропускной способности русла.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Для оценки разведанных запасов подземных вод в данных гидрогеологических условиях водохозяйственной деятельности необходимо было решить три задачи:

1) оценить эксплуатационные запасы подземных вод в условиях стокового периода, когда из Орто-Токойского водохранилища происходит попуск воды;

2) оценить эксплуатационные запасы применительно к гидрогеологическим условиям бесстокового периода, когда на месторождении нет питания подземных вод, т. е. в условиях частичной сработки емкостных запасов;

3) произвести оценку восполнения частично сработанных емкостных запасов подземных вод в последующий стоковый период.

Решение этих задач выполнялось в два этапа. Для решения первой задачи были проведены аналитические гидродинамические расчеты общей производительности линейного ряда инфильтрационного водозабора по схеме полуограниченного в плане пласта с контуром постоянного напора по руслу р. Чу с учетом несовершенства гидравлической связи подземных и поверхностных вод.

Для решения второй задачи была принята расчетная схема применительно к реальной конфигурации границ распространения продуктивного водоносного горизонта в плане с учетом неоднородности фильтрационных свойств по площади наличия на севере зоны естественной разгрузки. Решение этой задачи было выполнено методом математического моделирования на сеточной модели УСМ-1.

Третья задача решалась с помощью аналитических расчетов с учетом четырехлетних натурных исследований изучения режима подземных вод.

Для решения первой и второй задач были приняты следующие исходные гидрогеологические данные:

— заявленная потребность в воде на текущую перспективу 840 л/с, а на отдаленную — 1200 л/с;

— мощность продуктивного горизонта на стоковый период 73 м, на конец бессточного периода 63 м;

— коэффициент горизонтальной фильтрации на участке водозабора 137 м/сут;

— допустимое понижение уровня подземных вод продуктивного горизонта на конец бессточного периода 32 м, а на стоковый период 36 м (0,5 мощности пласта);

— длина линейного ряда водозаборного сооружения 1155 м, в пределах ряда расположены участки опытных кустов V, VI и VII, водозаборное сооружение состоит из восьми узлов эксплуатационных скважин, в каждом узле по три скважины;

— расстояние между водозаборными узлами 150 м;

— дебит каждой скважины в узле 50 л/с, суммарная произ-

водительность узла 150 л/с, общая производительность водозабора принята 1200 л/с, что соответствует заявленной потребности на перспективу.

Оценка эксплуатационных запасов для стокового периода, когда дебит водозаборных скважин будет формироваться исключительно за счет береговой инфильтрации поверхностных вод, была произведена по следующей расчетной формуле Форхгеймера (для линейного ряда взаимодействующих скважин):

$$S_{\text{рас}} = H - \sqrt{H^2 - \frac{0{,}732}{k}\left[Q_{\text{скв}}\left(\lg\frac{\rho}{r_c} + 0{,}217\xi\right) + \Sigma Q_i \lg\frac{\rho_i}{r_i}\right]}, \quad (22.2)$$

где $S_{\text{рас}}$ — расчетная величина понижения уровня в водозаборной скважине в центре водозабора при взаимодействии ее в линейном ряду; H — мощность безнапорного продуктивного горизонта; k — коэффициент фильтрации пласта; ξ — поправка на несовершенство скважины, для которой производится расчет [11]; r_c — радиус водозаборной скважины; r_i — расстояние от расчетной скважины до других узлов водозабора; ρ_i — расстояние до зеркальных отображений скважин — узлов водозабора (с учетом параметра ΔL); $Q_{\text{скв}}$ — дебит расчетного узла водозаборных скважин; Q_i — дебит взаимодействующих узлов водозаборных скважин.

Расчетные понижения уровней в узлах водозаборных скважин в стоковый период оказались в пределах от 4,4 до 6,3 м.

Как отмечалось выше, оценка эксплуатационных запасов подземных вод в бессточный период в реке производилась методом математического моделирования. Для решения задачи в соответствии гидрогеологическими условиями месторождения была принята однослойная сеточная модель, границы области моделирования четко определялись картой водопроводимости пласта и условиями распространения в плане водоносного горизонта. Значения водопроводимости пласта на модели изменялись в зависимости от величины снижения уровня (степени осушения пласта). Решение задачи определялось продолжительностью бессточного периода — 250 сут в году. На модели было учтено наличие участка естественной разгрузки грунтовых вод.

Водоотбор на модели задавался на участке расположения опытных кустов V, VI, VII и скважиной 777 в восьми блоках-узлах (как и для условий стокового периода) с равномерной нагрузкой на каждый блок.

Расчетная величина понижения уровня в водозаборных скважинах при работе в бесстоковый период будет слагаться из понижения в самой скважине, снятого с модели $S_{\text{м}}$; дополнительного понижения уровня за счет размера блока $\Delta S_{\text{бл}}$, а также за счет несовершенства эксплуатационных скважин $\Delta S_{\text{несов}}$, которое можно определить по формуле

$$S_{1\ \text{рас. скв}} = S_{\text{м}} + \frac{0{,}366Q}{km}\left(\lg\frac{0{,}2\Delta x}{r_0} + 0{,}217\xi\right), \qquad (22.3)$$

где $S_{1\ \text{рас. скв}}$ — расчетное понижение уровня в водозаборной скважине в бессточный период; $\Delta x = 100$ м — размер блока на модели; $r_0 = 0{,}11$ м — радиус скважины; ξ — фильтрационное сопротивление, учитывающее несовершенство водозаборных скважин (определяется по таблицам) в зависимости от длины фильтра и мощности горизонта.

Учитывая, что сработка уровней подземных вод в бессточный период будет происходить уже от ранее сниженного значения динамического уровня при работе водозабора в период наличия стока, общая величина понижения уровня к концу бессточного периода будет определяться как сумма двух значений рассчитанных понижений при разных гидрогеологических условиях водозабора.

Расчетное понижение уровня определялось для центральной скважины ряда. Результаты расчета приводятся в табл. 30.

Таблица 30. Расчетные поинижения уровня в стоковый бессточный периоды

Заданный расход водозабора, л/с	Понижение уровня на модели, м				Суммарное понижение уровня на конец бессточного периода, м
	В бессточный пернод			В стоковый период	
840	13,7	1,1	14,8	4,4	19,2
1200	19,5	1,7	21,2	6,3	27,5

Примечание. При оценке принято значение водоотдачи 0,1.

Как видно из приведенных результатов моделирования и аналитических расчетов на конец бесстокового периода, суммарное значение понижения уровня будет меньше допустимых значений, что подтверждает обеспеченность разведанных запасов.

Как показали результаты моделирования, в бессточный период под влиянием эксплуатации водозабора будут полностью сдренированы родники в северной части месторождения.

Решение третьей задачи по оценке условий восполнения частично срабатываемых емкостных запасов подземных вод было выполнено непосредственно по данным натурных наблюдений. Изучение режима изменения уровня в годовом разрезе, характеризующего сработку и возобновление запасов в условиях периодических попусков из Орто-Токойского водохранилища, проводилось на протяжении трех лет (1976—1978 гг.).

Выше отмечались гидрогеологические особенности Сары-Булунского месторождения, когда в период независимого режима (отсутствия стока в реке основного источника питания подземных вод) происходит сработка их емкостных запасов путем постоянной разгрузки в северной части месторождения.

Режимными наблюдениями было установлено, что годовая амплитуда колебания уровня подземных вод на разведочном участке (10—12 м) в многолетнем разрезе практически является постоянной (рис. 71).

Время восполнения сработанных запасов четко определяется характером и режимом попусков поверхностных вод. При этом по участку месторождения протекают поверхностные воды, осветленные от твердого стока в Орто-Токойском водохранилище, что практически исключает возможность проявления процессов кольматации русловых отложений реки Чу.

Режимные наблюдения также показали, что вблизи русловой части реки подъем уровня происходит довольно быстро (1—2 сут), а в периферийных частях долины процесс возобновления запасов продолжается до конца стокового периода. Общая продолжительность возобновления запасов составляет 26—31 сут (при наличии в северной части месторождения родникового стока). По данным режимных наблюдений были составлены карты годовых амплитуд колебания уровня подземных вод, позволяющие оценить объем восполнения их запасов. Если принять значение водоотдачи равным 0,1, то объем сработки составит $1{,}9 \cdot 10^7$ м^3; при значении водоотдачи 0,2 этот объем удвоится (наблюдения за 1979 г.).

Учитывая, что при эксплуатации будущего водозабора производительностью 1200 л/с сработка запасов в период независимого режима будет происходить более интенсивно, общий объем восполняемых запасов, как показали простые расчеты, возрастет до $4 \cdot 10^7$ м^3. Объем восполнения запасов, таким образом, в период попусков будет всего в два раза больше фактически зафиксированного в естественных условиях, что вполне реально.

Категоризация разведанных запасов, как известно, является завершающим этапом их оценки. Для данных конкретных гидрогеологических условий Сары-Булунского месторождения категоризация эксплуатационных запасов была выполнена следующим образом. Линейный ряд скважин будущего водозабора при

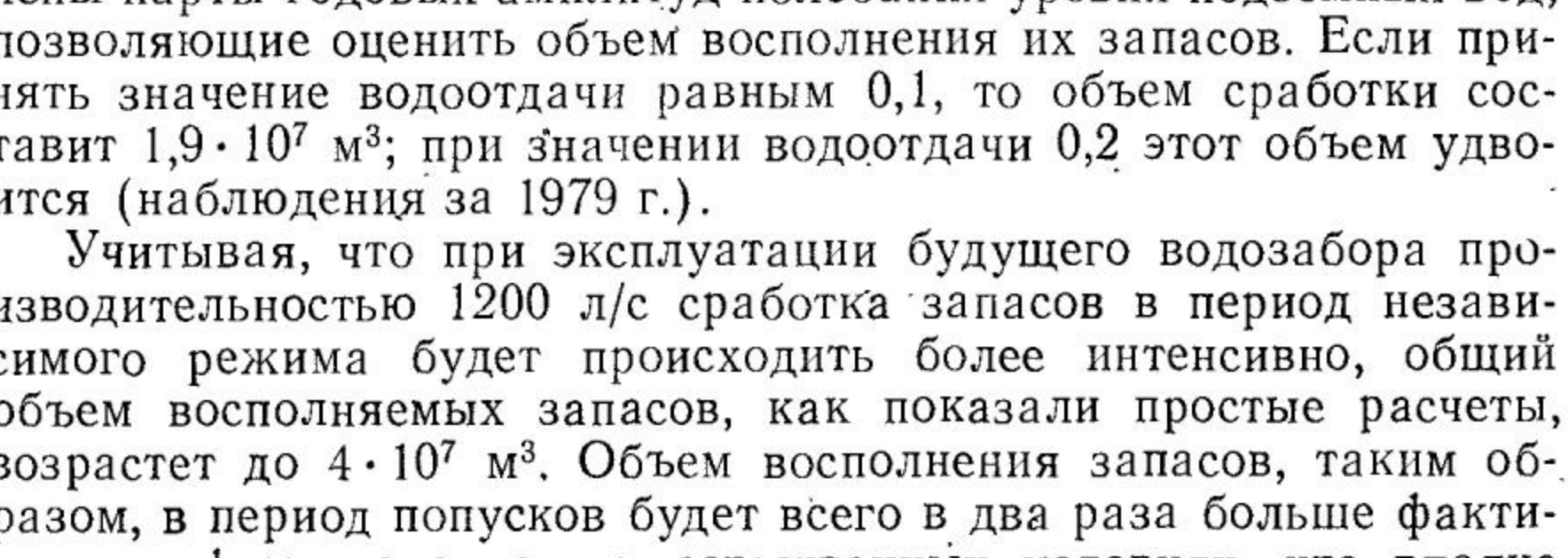


Рис. 71. График наблюдений за режимом подземных вод по скв. 782

оценке запасов должен быть расположен вдоль р. Чу на участках V, VI и VII (см. рис. 66 и 67).

К категории А при этих условиях могут быть отнесены разведанные запасы, соответствующие расчетным дебитам пробуренных и опробованных кустовыми откачками разведочно-эксплуатационных скважин опытных кустов V (скв. 891, 893 и 1138), VI (скв. 991), VII (скв. 895 и 777) и совмещенных с каждой из скважин по две проектируемые скважины. Таким образом, к категории А отнесены дебиты фактически пробуренных скважин и четырех проектируемых скважин, общий дебит которых 600 л/с.

К разведанным запасам категории В были отнесены расчетные дебиты проектируемых скважин, расположенных между разведочными кустами. В каждой точке при этом рекомендуется разместить по три рядом расположенные эксплуатационные скважины с дебитом 50 л/с (с общей нагрузкой 150 л/с), что доказано фактически опытными кустовыми откачками, проведенными на участке опытного куста V в бессточный период. В соответствии с этим проектируется пробурить на водозаборе еще дополнительно по три скважины в четырех эксплуатационных точках общей производительностью 600 л/с (51,8 тыс. м³/сут).

Всего по промышленным категориям было представлено к утверждению в ГКЗ СССР по категории А — 51,8 тыс. м³/сут и по категории В — 51,8 тыс. м³/сут, т. е. 1200 л/с, что полностью удовлетворяет заявленную потребность в воде с учетом перспективного роста потребления.

Кроме того, по месторождению были оценены эксплуатационные запасы по категории C_1.

Глава 23

РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПЛОЩАДИ ТАЛИКОВОЙ ЗОНЫ ДРЕВНЕЙ РЕЧНОЙ ДОЛИНЫ

Описываемое месторождение подземных вод относится к первому типу второго подтипа, в соответствии с принятой классификацией (см. табл. 5). Оно расположено в области распространения многолетнемерзлых пород и приурочено к ограниченному по площади подрусловому талику древней речной долины с периодически действующим поверхностным потоком. По степени сложности гидрогеологических условий для целей разведки месторождение следует отнести ко второй группе.

Опыт многолетней эксплуатации сравнительно крупного водозабора с периодическим отбором, сработкой и последующим возобновлением емкостных запасов, расположенного в одной из древних долин зоны вечной мерзлоты, подтверждает отмеченное выше предположение о том, что в районах распространения

многолетнемерзлых пород могут быть обнаружены крупные месторождения подземных вод. Горно-складчатый район, где расположено месторождение, характеризуется резко континентальным климатом. Многолетняя среднегодовая температура воздуха является отрицательной и равна — 9,2° С. Количество выпадающих атмосферных осадков изменяется по годам от 400 до 850 мм. Продолжительность периода с отрицательной температурой составляет 240—250 дней в году. Подземные воды на месторождении приурочены к песчано-галечниковым аллювиальным образованиям древней горной долины, имеющей поверхностный сток только в теплое время года (примерно 4—5 мес в году). Среднемноголетний сток реки равен 1,34 м³/ с. Данные по режиму поверхностного стока реки приводятся в табл. 31. В районе месторождения широко распространена мощная толща многолетнемерзлых горных пород (мощность более 150—200 м). Исключение составляет небольшой участок талых аллювиальных пород в северной части древней долины, распространенных непосредственно под современным руслом реки (подрусловая таликовая зона).

Подземные воды древней долины формируются в валунно-галечниковых и песчано-гравийных образованиях четвертичного возраста. На южном и центральном участках долины водовмещающие песчано-галечниковые образования с поверхности перекрыты слоем непроницаемых глин мощностью от 3—4 до 60 м.

Таблица 31. Среднемесячные расходы воды в реке по гидропостам 2 (F = 35,1 км²) и 3 (F = 40,6 км²) и величина инфильтрационных потерь между ними за 1967 г.

Месяц	Среднемесячный расход воды, м³/с		Инфильтрационные потери, м³/с
	Гидропост 2	Гидропост 3	
I	0,07	0,001	0,069
II	0,067	0,000	0,067
III	0,064	0,000	0,064
IV	0,059	0,000	0,059
V	0,2	0,009	0,191
VI	8,06	7,52	0,44
VII	3,95	3,19	0,76
VIII	0,84	0,28	0,56
IX	3,67	5,00	1,33
X	1,47	1,07	0,40
XI	0,21	0,14	0,07
XII	0,15	0,69	0,081
Средний расход за год, м³/с	1,57	1,44	0,13
Средний расход за лето, м³/с	4,13	3,997	0,133
Средний объем стока за год, млн. м³	49,512	45,412	4,100
Средний объем стока за лето, млн. м³	42,820	41,441	1,379

Мощность водоносного горизонта древней долины постепенно увеличивается с юга на север вверх по долине. В поперечном разрезе мощность водоносного горизонта уменьшается от осевой части долины к ее бортам, соответственно от 80 до 3—5 м вплоть до полного выклинивания.

Глинистые породы, распространенные в южной части древней долины реки, резко сужают живое сечение потока подземных вод, и поэтому на этом участке формируется естественная их разгрузка летом в виде родников, а в зимнее время в виде наледей (рис. 72). Наледи, занимая сравнительно большую площадь распространения, явились надежным поисковым признаком, на основании которого и было открыто новое для района Сибири месторождение подземных вод таликовой зоны древней речной долины.

На площади распространения сквозного талика подземные воды в летний период имеют тесную связь с поверхностными водами реки; в зимнее время в период полного промерзания водотока подземные воды лишаются источника питания и их уровни вскрываются на глубине от 5 до 25 м. Накопленные в летнее время в песчано-галечниковых образованиях емкостные запасы в зимнее время постепенно расходуются в виде родникового стока, а затем в виде образования наледи.

Условия формирования подземных вод древней долины приведены на рис. 73. Разведочные работы на воду на месторождении древней долины выполнялись в три стадии: детальных поисков, предварительную и детальную разведку.

На стадии детальных поисков на площади древней долины

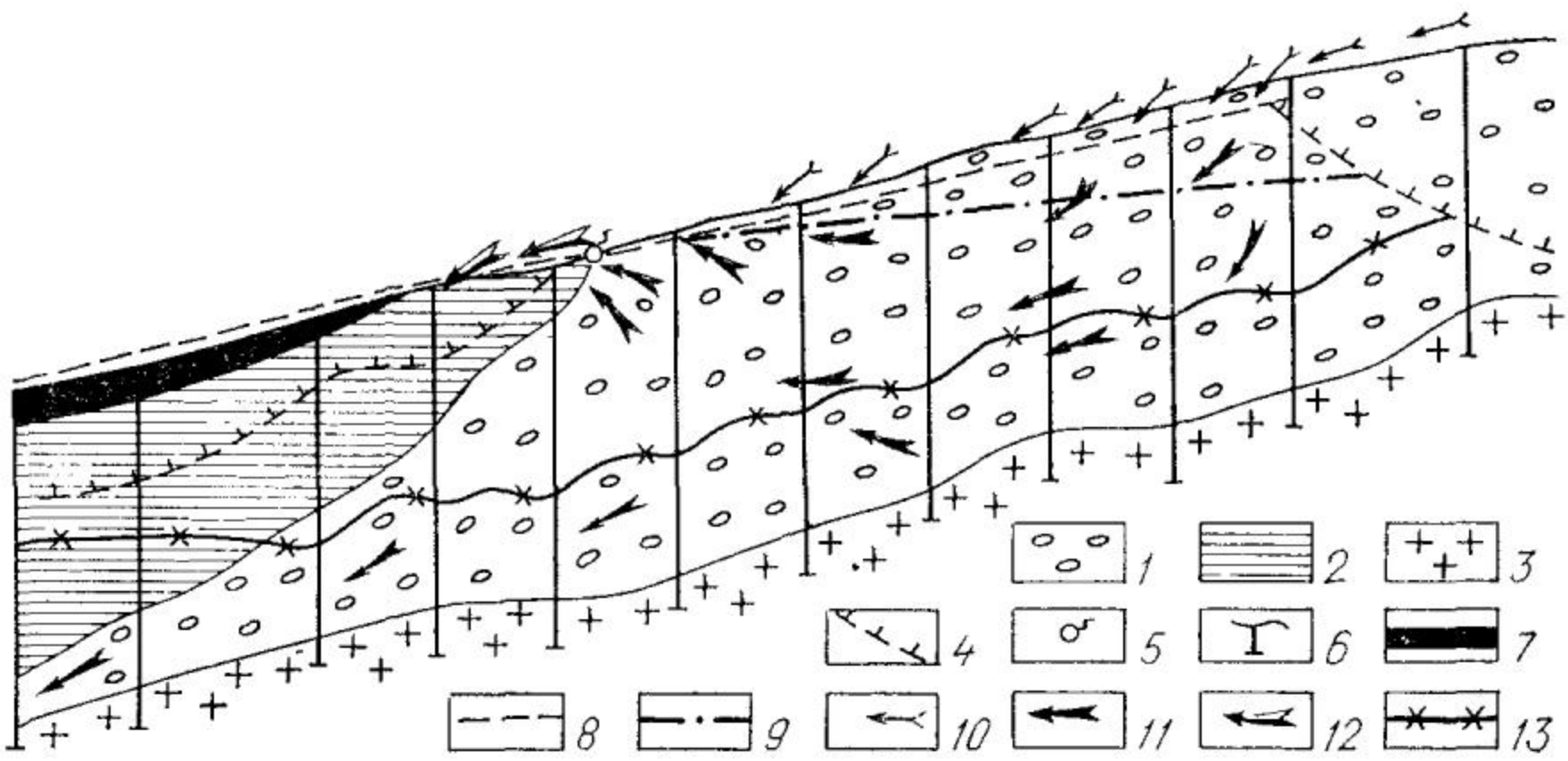


Рис. 72. Схема питания водоносного горизонта (продольный разрез долины реки).

1 — водоносные галечники; *2* — глины; *3* — слабопроницаемые эффузивы; *4* — контур вечной мерзлоты; *5* — источник; *6* — скважина; *7* — наледи; *8* — максимальный уровень грунтовых вод; *9* — минимальный уровень грунтовых вод; *10* — направление инфильтрации речных вод; *11* — направление движения грунтовых вод; *12* — направление естественной разгрузки грунтовых вод; *13* — прогнозный уровень грунтовых вод при работе водозабора

были проведены комплексная мерзлотно-гидрогеологическая съемка и наземные геофизические исследования — электропрофилирование и вертикальное электрозондирование. Результаты наземных геофизических работ были положены в основу размещения в древней долине картировочных и поисковых скважин, а также были использованы для оценки условий распространения на месторождении многолетнемерзлых пород. Во всех буровых скважинах проводились термометрические исследования, а также пробные откачки.

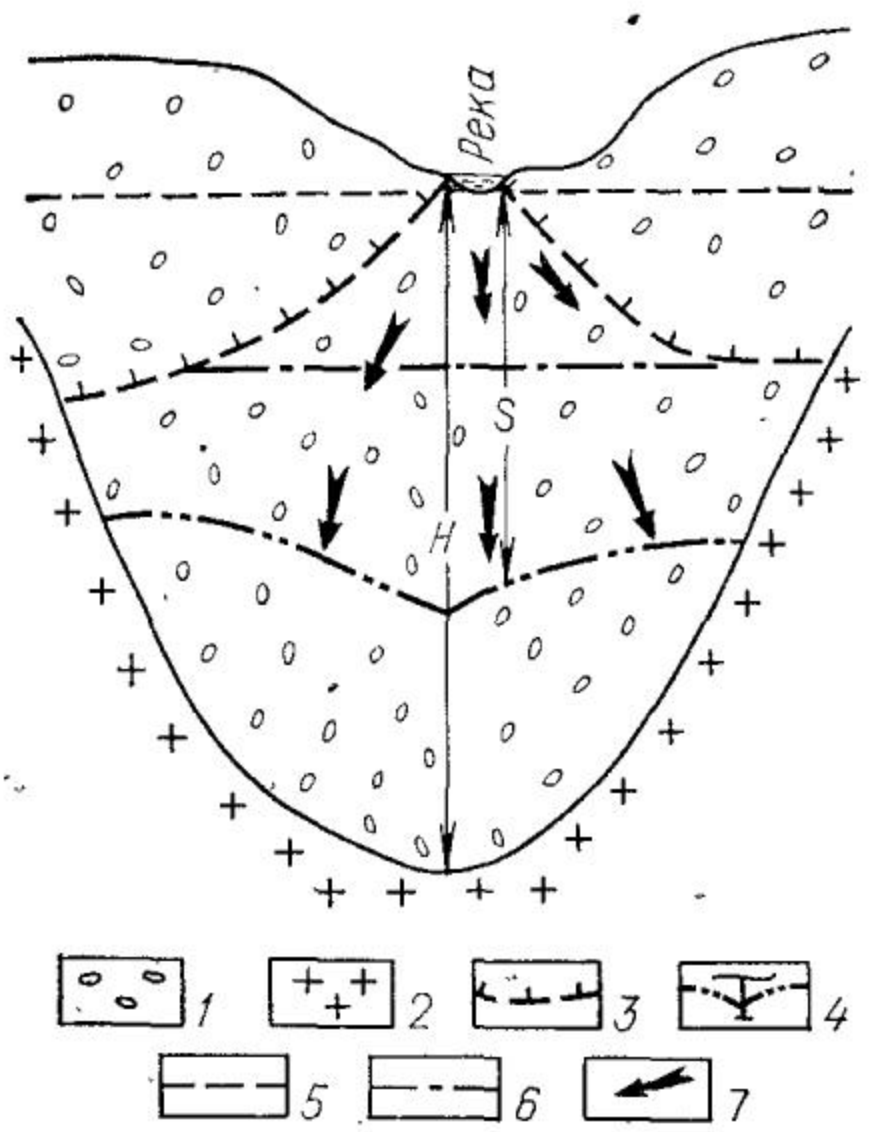


Рис. 73. Схема питания водоносного горизонта (поперечный разрез древней долины).

1 — водоносные галечники; *2* — слабопроницаемые эффузивы; *3* — контур вечной мерзлоты; *4* — скважина и депрессионная воронка; *5* — максимальный уровень грунтовых вод; *6* — минимальный уровень грунтовых вод; *7* — направление движения потока

По результатам поисково-съемочных работ в пределах древней речной долины была произведена оценка перспективной площади, по которой общие эксплуатационные запасы подземных вод определялись балансовым методом по категории C_2, с целью обоснования необходимости постановки в дальнейшем на месторождении предварительной разведки.

В стадию предварительной разведки на месторождении был выполнен следующий комплекс работ: а) детальные геофизические работы с целью всестороннего исследования мерзлотно-гидрогеологических условий на площади перспективного участка древней долины; б) бурение разведочных и дополнительных наблюдательных скважин; в) опытные кустовые откачки с целью уточнения гидрогеологических параметров; г) наблюдения за режимом подземных вод для установления взаимосвязи подземных и поверхностных вод; д) балансово-гидрометрические исследования с целью изучения режима поверхностного стока; е) изучение фильтрационных свойств пород, слагающих покровные образования современного русла реки с целью оценки условий возобновления запасов подземных вод в стоковый период.

В стадию предварительной разведки большое внимание было уделено: а) уточнению фильтрационных свойств водовмещающих пород по площади и в вертикальном разрезе; б) изучению с помощью натурных исследований (режимных и балансово-гидрометрических) условий возобновления емкостных запасов подземных вод, срабатываемых в зимнее время года,

когда сток реки полностью промерзает до дна и водоносный горизонт не получает питания; в) решению теплофизических задач (методом моделирования) с целью прогнозной оценки возможного изменения мерзлотных условий в период будущей длительной эксплуатации подземных вод (оценка возможной миграции границы распространения многолетнемерзлых пород в зимнее время, когда понижение уровня грунтовых вод в скважинах водозабора достигает глубин от 15 до 35 м).

Обработка материалов кустовых откачек производилась обычным графоаналитическим методом с помощью графиков временно́го и площадного прослеживания уровня.

Результаты опробования водоносного горизонта показали, что коэффициенты фильтрации водоносных пород изменяются от 1—2 м/сут в бортовой части долины до 85—200 м/сут в осевой части. В соответствии с этим удельные дебиты скважин изменяются от 0,2—2 до 8,5—64 л/с. Фильтрационные свойства водовмещающих пород в осевой части сквозного талика оказались однородными.

По качеству подземные воды древней долины, как показали гидрогеохимические исследования, полностью отвечают требованиям ГОСТа для хозяйственно-питьевых вод.

Исследования количественной оценки естественных запасов подземных вод показали следующие результаты. В контуре древней речной долины на разведочной ее части объем естественных емкостных запасов подземных вод при максимальном положении уровней в конце летнего периода составляет 63 млн. м^3; минимальный объем запасов формируется в зимнее время в количестве 50—55 млн. м^3. Около 10—12 млн. м^3 подземных вод разгружается в зимний период из водоносного горизонта в виде родников и наледей.

По результатам предварительной разведки были выполнены балансовые и аналитические расчеты с целью оценки эксплуатационных запасов подземных вод по категориям B и C_1 и выбрана наиболее рациональная схема будущего водозаборного сооружения. В эту стадию была решена и теплофизическая задача. Требовалось детально исследовать температурный режим толщи мерзлых горных пород, контактирующих с отложениями сквозного талика, расположенного в русле древней реки и предопределяющего условия восполнения запасов подземных вод месторождения при систематическом нарастании мощностей водоотбора и повышения уровня. Подлежащий исследованию теплофизический процесс был воспроизведен на гидравлическом интеграторе, предназначенном для решения задач по расчету неустановившейся теплопередачи.

Результаты моделирования показали, что эксплуатация подземных вод месторождения и, как следствие, увеличение объемов инфильтрации поверхностных вод создают еще более благоприятные условия для питания подземных вод (по сравнению с естественными условиями) в связи с увеличением размеров

сквозного талика, а также приводят к увеличению аккумулирующей емкости древней долины за счет оттаивания мерзлых пород над водоносным горизонтом.

По результатам расчетов мерзлые породы, контактирующие с отложениями сквозного талика (вертикальный контакт), по мере наращивания отбора объемов воды будут оттаивать и через 5, 10, 20, 30, 40, 50 лет сквозной талик расширится соответственно на 7, 13, 8, 27, 40, 52 м, а мерзлые породы, залегающие над водоносным горизонтом (горизонтальный контакт) за то же время соответственно уменьшат мощность на 1,5; 4,2; 11,4; 17,5; 23; 28,5 м.

На стадии детальной разведкн, учитывая реальные эксплуатационные возможности месторождения, а также острую потребность в воде, основные виды гидрогеологических работ были совмещены со стадией поочередного строительства собственно водозаборного сооружения. Бурение и испытание разведочно-эксплуатационных скважин на водозаборном участке производились строго по схеме запроектированного каптажного сооружения и по мере их опробования передавалось в опытную эксплуатацию. В короткий срок были введены поочередно в работу 12 разведочно-эксплуатационных скважин, суммарная производительность которых к концу 1970 г. составила 600 л/с. Такое совмещение комплекса гидрогеологических работ в стадию детальной разведки со строительством собственно водозабора и опытно-промышленной его эксплуатацией оказалось экономически целесообразно и гидрогеологически оправдано.

Двухлетняя опытно-промышленная эксплуатация подземных вод позволила оценить собственно эксплуатационные запасы по высоким промышленным категориям; наиболее надежным способом проверить достоверность ранее выполненных гидродинамических расчетов, в деталях изучить условия сработки и восполнения эксплуатационных запасов в период весенне-летнего поверхностного стока и одновременно ускорить решение задачи по водоснабжению крупного промышленного объекта.

Режимными наблюдениями, проведенными в процессе двухлетней опытно-промышленной эксплуатации водозаборного сооружения, было четко установлено, что восполнение ранее сработанных в зимнее время запасов подземных вод в летний паводковый период происходит очень быстро — в течение 10—15 сут. Расчетами было установлено, что в принципе такие условия восполнения емкостных запасов сохранятся при расходах реки в период 95%-ной обеспеченности.

Методика аналитических расчетов эксплуатационных запасов, разработанная для речных долин с периодическим питанием, действием поверхностного стока, может быть применена и для древних речных долин районов Сибири, где на площади сквозных таликовых зон были выявлены аналогичные условия формирования, сработки и возобновления запасов подземных вод. В связи с оценкой эксплуатационных запасов этим методом

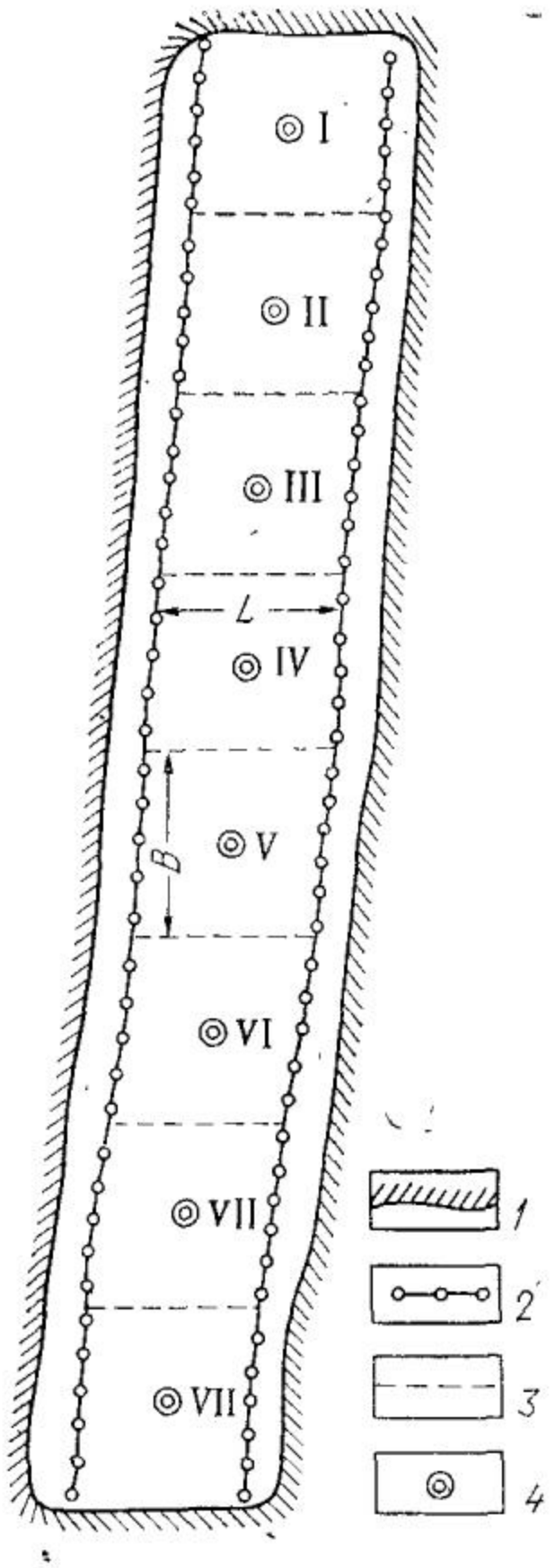


Рис. 74. Схема расчета эксплуатационных запасов (план расположения скважин).

1 — контуры распространения продуктивного горизонта; *2* — то же, с полезной мощностью; *3* — границы блоков; *4* — скважины в центре блоков. Римские цифры — номера блоков

природные условия месторождения были преобразованы в расчетную схему «пласт-полоса» с непроницаемыми границами в плане (на контакте с границей вечной мерзлоты), площадь которой разделена на условно изолированные между собой водоносные блоки.

Учитывая необходимость периодического возобновления запасов, водозаборное сооружение в виде линейного ряда скважин было размещено в осевой части древней долины, где водоносные породы таликовой зоны имеют максимальную мощность.

Для оценки эксплуатационных запасов для данных мерзлотно-гидрогеологических условий необходимо было провести: а) расчет производительности линейного ряда скважин, расположенных вдоль долины, в период отсутствия питания и сработки емкостных запасов подземных вод (наихудшие условия работы водозабора); б) оценку восполнения ранее сработанных емкостных запасов подземных вод в период действия поверхностного водотока.

Для решения первой задачи вся площадь водозаборного сооружения («пласт-полоса» водовмещающих пород) условно была разбита на восемь расчетных блоков для первой очереди и двенадцать — для второй очереди водозабора, в центре каждого расчетного блока располагалась одна эксплуатационная скважина (рис. 74).

Оценка эксплуатационных запасов подземных вод по восьми расчетным блокам с учетом периода независимого режима (отсутствия питания) и сработки емкостных запасов на величину $S_{доп}$ (0,6—0,7 мощности водоносного горизонта) была произведена по формуле

$$Q_{экс.\,б} = \frac{\pi k (2H - S) S}{\ln \frac{R_к}{r_0} + \frac{2at}{R_к^2} - \frac{3}{4}},$$

где $Q_{экс.\,б}$ — эксплуатационный дебит скважины, расположенной в центре каждого блока; k — коэффициент фильтрации; H — мощ-

ность водоносного горизонта; S — допустимая величина снижения уровня; r_0 — радиус скважины; a — коэффициент уровнепроводности; t — расчетное время работы скважины; $R_к$ — приведенный радиус блока, равный $\sqrt{BL/\pi}$ (L — длина, B — ширина блока).

Расчеты были выполнены раздельно для каждого блока с напорным и безнапорным уровнем подземных вод. Результаты расчетов эксплуатационных запасов подземных вод приведены в табл. 32.

Таблица 32. Результаты оценки эксплуатационных запасов подземных вод древней долины

Номер блока	Длина блока L, м	Ширина блока B, м	Приведенный радиус блока $R_к$, м	Напор над кровлей водоносного горизонта H, м	Мощность напорного водоносного горизонта m, м	Средняя мощность водоносного горизонта на конец эксплуатации $h_{ср}$, м	Коэффициент фильтрации k, м²/сут	Коэффициент уровнепроводности a, м²/сут	Эксплуатационные запасы по блоку, л/с
I	500	400	250	20	50	35	40	8 000	49,2
II	635	386	280	15	60	40	105	26 250	82,0
III	575	400	270	20	67	44	100	28 500	91,0
IV	600	400	275	—	55	35	40	9 000	60,3
V	600	500	310	—	66	43	110	30 250	96,0
VI	700	400	300	—	70	45	50	15 000	94,8
VII	750	450	335	—	70	45	100	30 000	122,0
VIII	750	550	365	15	50	35	100	20 000	112,0
IX	800	450	350	18	70	45	110	33 000	152,4
X	800	350	305	30	80	50	90	31 500	147,2
XI	850	300	290	40	55	38	50	11 250	81,8
XII	1000	160	235	40	55	38	30	6 750	50,0
							Всего		1139,0

Примечание. 1. При расчетах были приняты следующие значения параметров: коэффициент водоотдачи валунно-галечных отложений — 20%; радиус скважии — 0,2 м; коэффициент пьезопроводности — 10^5 м²/сут; расчетный период—240 сут; остаточная мощность водоносиого горизонта—20 м. 2. Коэффициент уровиепроводиости рассчитан по кустовым откачкам.

В стадию эксплуатационной разведки на водозаборном участке были продолжены комплексные исследования по изучению режима подземных и поверхностных вод. Результаты изучения режима эксплуатации первой и второй очереди водозабора подтвердили результаты разведки и ранее выполненных аналитических расчетов по оценке эксплуатационных запасов. Была установлена хорошая восполняемость емкостных запасов подземных вод древней долины. Так, отобранные в 1975 г. из продуктивного водоносного горизонта подземные воды в объеме 146,4 млн. м³ довольно быстро возобновлялись в паводок. При

этом уровни подземных вод в конце летнего периода (сезон постоянного поверхностного стока) во всех водозаборных скважинах фиксировались на максимальных отметках.

Вместе с тем опыт эксплуатации водозабора и режимные наблюдения показали, что при отборе из водоносного горизонта подземных вод в количестве 1100 л/с не полностью используются регулировочная емкость песчано-галечниковых отложений и степень восполнения запасов. Следовательно, эксплуатационные возможности месторождения могут быть увеличены.

Всего по месторождению в целом с учетом периодической сработки и возобновления эксплуатационные запасы подземных вод были утверждены в ГКЗ СССР в следующем количестве: по категории А — 700 л/с (подтвержденные опытом эксплуатации); по категории В — 400 л/с (обоснованные опытом эксплуатации второй очереди водозабора и многолетними режимными наблюдениями).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Башкатов Д. Н., Роговой В. Д.* Бурение скважин на воду. М., Недра, 1976.
2. *Белицкий А. С., Дубровский* В. В. Проектирование разведочно-эксплуатационных скважин для водоснабжения. М., Недра, 1974.
3. *Гольдберг В. М.* Гидрогеологические прогнозы и качество подземных вод на водозаборах. М., Недра, 1976.
4. *Биндеман Н. Н., Язвин Л. С.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. 2-е изд. М., Недра, 1970.
5. *Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., Недра, 1973.
6. *Боревский Б. В., Хордикайнен М. А., Язвин Л. С.* Разведка и оценка эксплуатационных запасов подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М., Недра, 1976.
7. *Бочевер Ф. М.* Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. М., Недра, 1968.
8. *Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян С. В.* Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород. М., Недра, 1977.
9. *Гавич И. К.* Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М., Недра, 1980.
10. *Гершанович И. М.* Гидрогеологические исследования в скважинах методом расходометрии. М., Недра, 1981.
11. *Дробноход Н. И., Язвин Л. С., Боревский Б. В.* Оценка запасов подземных вод. Киев, Вища школа, 1982.
12. *Жернов И. Е., Шестаков В. М.* Моделирование фильтрации подземных вод. М., Недра, 1970.

13. *Зекцер И. С., Язвин Л. С.* Научно-методические основы изучения ресурсов и запасов подземных вод. — В кн.: Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск, 1983, с. 210—225.

14. *Инструкция* по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям питьевых и технических вод. М., Изд-во Управления делами Совета Министров СССР, 1984.

15. *Инструкция* по установлению зон санитарной охраны хозяйственно-питьевых водопроводов с подземными источниками водоснабжения. М., Изд-во Управления делами Совета Министров СССР, 1976.

16. *Классификация* эксплуатационных запасов и прогнозных ресурсов подземных вод. М., Изд-во Управления делами Совета Министров СССР, 1983.

17. *Крашин И. И., Пересунько Д. И.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод методом моделирования. М., Недра, 1976.

18. *Лукнер Л., Шестаков В. М.* Моделирование геофильтрации. М., Недра, 1976.

19. *Методические* рекомендации по каротажу гидрогеологических скважин. М., Недра, 1972.

20. *Методическое* руководство по разведке и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., 1979 (ВСЕГИНГЕО).

21. *Методы* геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии (методическое руководство)/ В. С. Матвеев, Л. С. Язвин, Г. Я. Черняк и др. М., Недра, 1972.

22. *Мельхановицкий И. М., Ряполова В. А., Хордикайнен М. А.* Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных подземных вод. М., Недра, 1981.

23. *Минкин Е. Л.* Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических и водохозяйственных задач. М., Стройиздат, 1973.

24. *Мироненко В. А., Шестаков В. М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1978.

25. *Положение* о порядке проектирования и эксплуатации зон санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения. М., Медицина, 1983.

26. *Плотников Н. И.* Эксплуатационная разведка подземных вод. М., Недра, 1979.

27. *Плотников Н. И., Плотников Н. А., Сычев К. И.* Гидрогеологические осиовы искусственного восполиения запасов подземных вод М., Недра, 1978.

28. *Плотников Н. И., Краевский С.* Гидрогеологические аспекты охраны окружающей среды. М., Недра, 1983.

29. *Проектирование* водозаборов подземных вод/ Под ред. Ф. М. Бочевера. М., Стройиздат, 1976.

30. *Региональная* оценка ресурсов подземных вод. М., Наука, 1975.

31. *Романовский Н. Н.* Подземные воды криолитозоны. М., Изд-во МГУ, 1983.

32. *Шестаков В. М.* Динамика подземных вод. 2-е изд. М., Изд-во МГУ, 1979.

33. *Штенгелов Р. С.* Балансовая структура эксплуатационных запасов подземных вод. — Водные ресурсы, 1978, № 2, с. 101—106.

34. *Язвин Л. С.* Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. М., 1972 (ВСЕГИНГЕО).

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕДМЕТЕ 6

Глава 1. **Из истории развития гидрогеологических исследований при поисках и разведке пресных подземных вод в России** 6

Глава 2. **Роль пресных подземных вод в народном хозяйстве и общие требования к их использованию** 11

Глава 3. **Гидрогеологические условия выбора типа водозаборного сооружения** 15

Глава 4. **Классификация пресных подземных вод для целей водоснабжения** 20

Раздел II. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД 27

Глава 5. **Содержание гидрогеологических основ** 27
Основные понятия 27

Классификация месторождений подземных вод для гумидной и аридной областей 33
Классификация месторождений подземных вод в области распространения многолетнемерзлых пород 38
Типизация месторождения подземных вод, приведенная в инструкции ГКЗ СССР 41

Глава 6. **Гидрогеологическая характеристика промышленных типов месторождений пресных подземных вод и закономерности их распространения** 44

Месторождения подземных вод речных долин 44
Месторождения трещинно-карстовых вод карбонатных пород 51
Месторождения на площади распространения линз пресных подземных вод 58
Месторождения подземных вод на площади артезианских бассейнов платформенного типа 63
Месторождения подземных вод на площади артезианских бассейнов горно-складчатых областей 67
Месторождения подземных вод на площади конусов выноса 71
Месторождения подземных вод в межморенных отложениях 74
Месторождения трещинно-жильных вод зон тектонических нарушений . 76
Месторождения подземных вод в области распространения многолетнемерзлых пород 78

Раздел III. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД 85

Глава 7. **Общие принципы поисково-разведочных гидрогеологических работ** 85

Глава 8. **Поиски месторождений подземных вод** 95
Общие поиски 95

Детальные поиски 97
Использование поисковых критериев и признаков для прогнозной оценки изучаемой территории 99
Поисковые критерии 106
Поисковые признаки 110

Глава 9. **Методика разведки месторождений подземных вод** 113

Предварительная разведка 113
Детальная разведка 119
Эксплуатационная разведка 124
Особенности разведки различных типов месторождений подземных вод 127

Раздел IV. МЕТОДЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 134

Глава 10. **Гидрогеологическая съемка и геофизические методы** . . . 134

Глава 11. **Буровые работы** 145
Назначение и состав работ 145
Способы бурения и технические средства 150
Фильтры для оборудования гидрогеологических скважин 150

Глава 12. **Опытно-фильтрационные работы** 153

Группировка опытных откачек 153
Теоретические основы методики оценки гидрогеологических параметров . 155
Обработка данных опытных кустовых откачек 157
Определение параметров пласта по данным восстановления уровня после прекращения откачки 163
Обработка данных откачек в слоистых толщах 164
Обработка данных откачек для изучения граничных условий 168
Обработка результатов опытных работ в условиях безнапорных водоносных горизонтов и в трещиноватых горизонтах 171
Оценка водопроводимости по данным откачек из одиночных скважин . 173
Рекомендации по проведению опытно-фильтрационных работ 174

Глава 13. **Гидрологические исследования, изучение режима и качества подземных вод** 180

Гидрологические исследования 180
Стационарное изучение режима подземных вод 183
Качественное опробование подземных вод 187
Санитарное обследование района месторождения и обоснование зон санитарной охраны 188

Раздел V. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД . . 191

Глава 14. **Оценка естественных ресурсов и естественных запасов** . . 191
Оценка естественных ресурсов подземных вод 195
Оценка естественных запасов подземных вод 202

Глава 15. **Основные принципы и требования к оценке эксплуатационных запасов подземных вод** 203

Глава 16. **Методы оценки эксплуатационных запасов подземных вод** 217

Гидродинамический метод 222
Оценка эксплуатационных запасов методом математического моделирования 255
Гидравлический метод 259
Балансовый метод 262

Комбинированные методы оценки эксплуатационных запасов 263
Метод гидрогеологической аналогии 265
Особенности оценки эксплуатационных запасов подземных вод для целей орошения 267

Глава 17. **Оценка эксплуатационных запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения** 272

Глава 18. **Техногенные изменения свойств геологической среды под влиянием эксплуатации подземных вод** 281

Влияние отбора подземных вод на изменение геологической среды . . . 281
Защита подземных вод от загрязнений 288

Раздел VI. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 294

Глава 19. **Методика разведки и оценки эксплуатационных запасов Среднеклязьминского месторождения подземных вод** 294

Общие сведения о месторождении 294
Методика и основные результаты разведочных работ 299
Специальные исследования на опытном кусте-полигоне «Петушки» . . 307
Методика и основные результаты оценки эксплуатационных запасов подземных вод 309

Глава 20. **Особенности разведки и оценки эксплуатационных запасов Сурского месторождения подземных вод** 313

Общие сведения о месторождении 313
Методика изучения месторождения в стадию предварительной и детальной разведки 315
Методика оценки эксплуатационных запасов подземных вод на первом этапе исследований 318
Исследования в стадию эксплуатации месторождения 321

Глава 21. **Разведка Сергинского месторождения подземных вод** . . . 329

Природные условия месторождения 329
Методика выполнения разведочных работ в стадию предварительной разведки 332
Проектирование работ в стадию детальной разведки и оценка запасов . 333

Глава 22. **Разведка и оценка эксплуатационных запасов подземных вод Сары-Булунского месторождения** 341

Общие сведения о месторождении 341
Методика выполненных гидрогеологических работ 344
Оценка эксплуатационных запасов подземных вод 352

Глава 23. **Разведка месторождения подземных вод на площади таликовой зоны древней речной долины** 356

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 364