Библиотека СОК

556
К-561

В.С.КОВАЛЕВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ



В.С.КОВАЛЕВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ



МОСКВА „НЕДРА" 1986

УДК 556.3.01 →556.382

Ковалевский В.С. Исследования режима подземных вод в связи с их эксплуатацией. — М.: Недра, 1986. — 198 с. ил.

Сформулированы задачи изучения режима подземных вод на стадиях поисков, разведки, эксплуатации подземных вод и при региональных гидрогеологических исследованиях. Рассмотрены принципы размещения наблюдательной сети, особенности производства наблюдений за режимом подземных вод, методы анализа и обобщения данных. Уделено внимание прогнозу режима подземных вод с учетом естественных и нарушенных эксплуатацией условий, оценке влияния водоотбора на окружающую сраду.

Для специалистов, связанных с изучением, использованием и охраной от истощения и загрязнения подземных вод.

Табл. 6, ил. 32, список лит. — 48 назв.

Рецензент: *Л.С. Язвин* д-р геол.-минер. наук (Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии)

ВЛАДИМИР СЕРАФИМОВИЧ КОВАЛЕВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ

Редактор издательства *Л.А. Дубкова*
Обложка художника *К.В. Голикова*
Художественный редактор *Г.Н. Юрчевская*
Технические редакторы *Л.Н. Фомина, Л.Д. Агапонова*
Корректор *С.В. Зимина*
Оператор *И.М. Евдокимова*

ИБ № 5563

Подписано в печать 13.01.86. Т—06407. Формат 60 × 90 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная № 1. Набор выполнен на наборно-пишушей машине. Гарнитура "Универс". Печать офсетная. Усл.пач.л. 12,5. Усл.кр.-отт. 12,63. Уч.-изд.л. 14,71. Тираж 3300 экз. Заказ 185 /9414—2. Цена 80 коп.

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра",
103633, Москва, К—12, Третьякоаский проезд, 1/19
Московская типография № 9 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва Ж-33, Волочаевская, 40.

К $\frac{1904060000 - 085}{043(01) - 86}$ 178—86

© Издательство "Недра", 1986

Подземные воды являются важным полезным ископаемым и все шире используются в народном хозяйстве страны для водоснабжения, орошения земель, обводнения пастбищ, лечебных целей, извлечения ценных микрокомпонентов и теплофикации. Значителен отбор подземных вод при разработке различных месторождений полезных ископаемых. Возросла роль концентрированного водоотбора подземных вод для питьевого водоснабжения. Так, если 15—20 лет назад доля подземных вод в коммунальном водоснабжении составляла всего 10—15 %, то в настоящее время около 60 % городов страны используют для питьевых нужд подземные воды, около 20 % городов имеют смешанное водоснабжение (за счет подземных и поверхностных вод) и лишь около 20 % городских водозаборов используют только поверхностные воды [8]. Из общего потребления воды в нашей стране на долю подземных вод приходится пока лишь 13 %.

Выполненные за последние годы оценки естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод показали, что наша страна обладает значительными возможностями в использовании подземных вод. Так, проведенная коллективом авторов под руководством Б.И. Куделина оценка подземного стока на территории СССР показала, что естественные, 50%-ной обеспеченности, ресурсы подземных вод составляют около 30,5 тыс. $м^3/с$, т. е. примерно 930 $км^3/год$, или около 24 % среднегодового речного стока. Эксплуатационные запасы подземных вод оценены организациями Министерства геологии СССР под руководством Л.С. Язвина в 10,1 тыс. $м^3/с$. Из них используются лишь не более 10 %, т. е. около 960 $м^3/с$ [16].

Ресурсы подземных вод распределены по территории страны неравномерно и нередко там, где они особенно нужны, испытывается их недостаток. Не единичны случаи, когда для водоснабжения городов подземные воды требуемого качества и в необходимых количествах изыскиваются лишь на расстояниях 100—240 км. В некоторых республиках (Молдавия, Литва, Узбекистан, Грузия, Туркмения, Армения) уже в ближайшем будущем интенсивность освоения запасов подземных вод возрастет и станет соизмеримой с их величинами [13]. Об этом говорит тот факт, что за последние годы неуклонно увеличиваются объемы исследований и изысканий как новых подземных источников водоснабжения, так и доразведки старых в пределах существующих водозаборов. Так, если в 60-е годы ежегодный прирост запасов подземных вод составлял 90—100 $м^3/с$, то в 70-е годы он вырос до 120 $м^3/с$. При этом значительная часть этих изысканий проводится для крупного централизованного водоснабжения с производительностью водозаборов, измеряемой десятками и сотнями тысяч кубических метров в сутки.

Все это обязывает с особой тщательностью изучать ресурсы подземных вод, прогнозировать возможные изменения их количества и качества во времени под влиянием естественных и искусственных факторов, разрабатывать научные основы оптимального использования и управления режимом подземных вод.

Основы водного законодательства СССР и союзных республик определяют подземные воды питьевого качества, как наиболее ценную часть водных ресурсов, которая должна использоваться прежде всего для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Поэтому проектирование дальнейшего освоения подземных вод должно основываться прежде всего на научно обоснованном долгосрочном прогнозе роста потребности в хозяйственно-питьевых водах и сопоставлении этой потребности с детальными оценками ресурсов подземных вод. Лишь избытки воды, оставшиеся после удовлетворения этой потребности, оцененной на достаточно отдаленную перспективу, в каждом конкретном районе могут использоваться на орошение и технические нужды.

Увеличение использования ресурсов подземных вод должно сопровождаться разработкой принципов и методов их рационального освоения. Среди задач или проблем рационального использования подземных вод, требующих решения, можно назвать следующие.

1. Усовершенствование методов детальной оценки ресурсов подземных вод, особенно с учетом всех наиболее существенных, но ранее не принимавшихся во внимание резервов. К таким резервам можно отнести снятие и использование непродуктивного испарения, увеличение во времени питания подземных вод за счет перетекания из смежных водоносных горизонтов, учет неравномерности сезонного и многолетнего питания подземных вод для определения более полной сработки емкости водоносных горизонтов в маловодные периоды при обоснованной гарантии полного восполнения сработанных запасов подземных вод в последующие многоводные периоды. С этим связано обоснование оптимальной обеспеченности питания подземных вод, закладываемой в расчеты, что позволит в ряде случаев повысить естественные и привлекаемые ресурсы подземных вод при оценках эксплуатационных запасов по сравнению с обычно принимаемым в расчеты минимальным (95 или 90%-ная обеспеченность) питанием подземных вод.

Повышение точности оценки эксплуатационных запасов подземных вод на действующих и разведываемых водозаборах позволит в некоторых случаях избежать новых разведочных работ, строительства дополнительных водозаборов, так как заявленные потребности могут быть удовлетворены местными ресурсами, или обосновать срочность принятия альтернативных решений (переброска стока и др.).

2. Разработка методов прогноза различных последствий, вызванных влиянием хозяйственной деятельности человека на подземные воды и окружающую среду. Поздемные воды, как известно, являются не только частью гидросферы Земли, но и частью окружающей нас среды. Поэтому нарушение естественного режима и естественных условий формирования ресурсов подземных вод в ряде случаев может привести к существенным

экологическим изменениям. В одних случаях эти изменения имеют благоприятный характер (увеличивают запасы подземных вод, формируют линзы пресных вод, плавающие на соленых), в других — ухудшают гидрогеологические условия (приводят к засолению подземных вод, подтоплению и заболачиванию земель, ухудшают восполнение запасов подземных вод за счет уменьшения числа и интенсивности паводков, приводят к провалам земной поверхности, активизации карста и т. д.). Количественный прогноз всех этих изменений имеет большое практическое значение.

3. Разработка комплексных водохозяйственных решений как для ряда гидрогеологических задач одновременно, так и для рационального комбинированного использования поверхностных и подземных вод с учетом их взаимодействия. Например, использование подземных вод для целей водоснабжения или орошения в комплексе с вертикальным дренажем мелиорируемых территорий, осушение шахтных и карьерных полей с использованием дренажных вод для водоснабжения, повторное использование возвратных вод, достигающих 90 % при коммунальном водоснабжении и 10—20 % при орошении.

Наиболее перспективно комбинированное использование поверхностных и подземных вод. Например, использование подземных вод для целей орошения лишь в отдельные маловодные годы, подпитывание рек в маловодные периоды за счет подземных вод, подземное регулирование поверхностного стока, когда в летние и зимние периоды осуществляется сработка емкости водоносных горизонтов водозаборами с последующим полным восполнением запасов подземных вод паводковыми водами рек.

4. Создание научных основ управления ресурсами подземных вод. Эта фундаментальная стратегическая научная проблема включает в себя исследование процессов формирования подземных вод, разработку теории и методов гидрогеологического прогнозирования и создание моделей управления режимом и ресурсами подземных вод, включая постоянно действующие модели крупных регионов.

Решение всех этих вопросов невозможно без всестороннего и детального изучения режима подземных вод как в плане исследований закономерностей и процессов формирования режима и ресурсов подземных вод в целом, так и исследований закономерностей режима, баланса и ресурсов подземных вод под влиянием их интенсивной эксплуатации.

Изучение процессов формирования подземных вод базируется на региональных обобщениях накопленных обширных эмпирических данных, экспериментальных и теоретических исследованиях, направленных на выявление пространственно-временны́х закономерностей формирования режима и баланса подземных вод, на выявлении количественных связей между основными факторами и условиями, определяющими изменчивость режима и ресурсов подземных вод во времени и в пространстве.

Изучение изменений режима и баланса подземных вод под влиянием эксплуатации базируется на всестороннем анализе опыта эксплуатации подземных вод на действующих водозаборах и горнорудных предприятиях. Только в процессе эксплуатации удастся познать закономерности нарушенного режима подземных вод, определить изменчивость структуры

эксплуатационных запасов во времени, оценить истинную роль различных границ пластов, определить влияние водоотбора на переформирование баланса водоносных горизонтов и оценить его влияние на среду. Такие наблюдения позволяют уточнить и обосновать расчетные параметры, дать достоверные прогнозы изменений гидрогеологических условий.

В данной работе определяются цели и задачи изучения режима подземных вод в связи с их эксплуатацией в соответствии с современными требованиями и тенденциями, проводится рассмотрение комплекса методических вопросов, связанных с обоснованием необходимой наблюдательной сети, особенностями производства наблюдений и анализа результатов наблюдений на различных этапах изучения ресурсов подземных вод для их рационального использования и охраны от преждевременного истощения или загрязнения.

В работе сделан основной упор на рассмотрение особенностей изучения режима подземных вод в связи с их эксплуатацией для целей водоснабжения. Аналогичные особенности могут быть встречены и в других случаях, например при исследованиях режима подземных вод в связи с разработкой месторождений полезных ископаемых.

Важность рассматриваемых вопросов отмечалась неоднократно. Еще в 1938 г. М.Е. Альтовским на примере начавшейся интенсивной эксплуатации подземных вод в Московском артезианском бассейне была доказана необходимость систематических наблюдений за режимом подземных вод. Аналогичные задачи были поставлены Е.Л. Минкиным, Л.С. Язвиным, Н.И. Плотниковым, В.Д. Гродзенским, Б.В. Боревским, автором и др.

Следует отметить, что за последние годы накопился обширный опыт оценок эксплуатационных запасов подземных вод как в региональном плане, так и на участках конкретных водозаборов. Это нашло отражение в настоящей работе. При этом представлялось целесообразным рассмотреть круг вопросов, связанных с изучением режима подземных вод для целей их эксплуатации с учетом новых требований ГКЗ [15], а также современных требований к изучению, использованию и охране подземных вод. Необходимо отметить, что в "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года" к числу важнейших народнохозяйственных задач отнесено повышение эффективности работ в области охраны и рационального использования водных ресурсов, являющихся существенным фактором развития производства и сельского хозяйства.

Влияние роли водного фактора на развитие экономики, а также благосостояние и здоровье людей признано во многих странах мира, а десятилетие 1981—1990 гг. ЮНЕСКО провозгласило международным десятилетием улучшения водоснабжения и санитарного состояния водных объектов питьевого назначения и призвало правительства всех стран активно включиться в реализацию этой программы.

Глава 1
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Изучение режима подземных вод является, как известно, одной из составляющих частей в общем комплексе гидрогеологических исследований, проводимых для оценки перспектив использования подземных вод для различных целей в целом, в том числе для оценки их эксплуатационных запасов. Под последними понимается количество подземных вод, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям ГОСТа в течение всего расчетного срока потребления. Из этого определения следует, что гидрогеологические исследования, включая изучение режима подземных вод, должны быть нацелены на обоснование рациональных объемов и режима отбора подземных вод, наиболее экономичных и эффективных условий эксплуатации, а также на оценку возможных последствий эксплуатации, что также входит в понятие ее рациональности и целесообразности. В сложившейся практике гидрогеологических исследований оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов и запасов подземных вод проводится в три различных по степени своей детальности основные этапа или стадии:
1) региональных оценок эксплуатационных ресурсов подземных вод (стадия общих поисков и оценок);
2) поисков и разведки подземных вод;
3) анализа опыта эксплуатации действующих водозаборов (стадия эксплуатационной разведки).

Задачи изучения режима подземных вод на всех этих этапах в целом индентичны, они призваны прежде всего оценить условия формирования эксплуатационных запасов подземных вод, их качество, а также послужить уточнению расчетных гидрогеологических параметров и границ водоносных горизонтов. Однако специфика решения этих задач, особенности исходной информации и ее анализа в значительной мере различны, а поэтому их следует рассмотреть отдельно.

ЗАДАЧИ АНАЛИЗА РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ ПРОГНОЗНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Региональная оценка эксплуатационных запасов (ресурсов) подземных вод производится для крупных гидрогеологических районов в целях получения общих представлений об условиях их формирования в регионе и имеющих место суммарных потенциальных или перспективных ресурсах подземных вод в этих районах. Такие оценки применяются для обоснования схем комплексного использования охраны водных ресурсов в целом

и для планирования развития использования подземных вод на перспективу, в частности. На основе этих оценок планируются поисково-разведочные работы на подземные воды. Главной особенностью таких оценок является то, что они проводятся преимущественно на базе существующих гидрогеологических материалов без проведения специальных разведочных работ или при ограниченном их объеме. Это и определяет в отдельных случаях невысокую степень их точности, которая должна постепенно повышаться. Так, если при первой оценке, выполненной под методическим руководством Н.Н. Биндемана в 1964 г., учитывались в основном естественные запасы подземных вод, то во второй оценке, выполнявшейся под руководством Л.С. Язвина [6], были уже учтены и питание, и привлекаемые ресурсы. Проведение подобных региональных оценок и в будущем не исключается, но они будут строиться, как правило, на иных принципах и проводиться с большей детальностью — в более крупных масштабах, применительно к конкретным и проектируемым потребителям, на основе моделирования, т. е. такие оценки будут строиться на гидрогеологических моделях крупных регионов. Подобные оценки по отдельным наиболее изученным территориям (Прибалтийскому, Московскому, Терско-Кумскому, Крымскому артезианским бассейнам, части Куринской впадины — Карабахская степь) были уже проведены в процессе второго этапа регионального изучения эксплуатационных запасов подземных вод. Если на первых двух этапах региональных оценок материалы режима подземных вод практически не учитывались и при той детальности, с которой они выполнялись, этими данными можно было пренебречь, то при региональных оценках очередного этапа такие данные потребуются. При региональных оценках с применением моделирования уже отмечалась нехватка данных о режиме подземных вод. Каких-либо специальных исследований режима подземных вод при этих оценках, как правило, не производится, а используются существующие данные о режиме подземных вод в регионе (естественном и нарушенном), получаемые как по опорной, так и по специализированной наблюдательной сети Мингео СССР и других ведомств. Анализ результатов таких наблюдений, проводимых в целях региональной оценки ресурсов подземных вод, обычно включает.

1. Изучение закономерностей сезонной и многолетней изменчивости режима подземных вод, в том числе: оценку продолжительности мало- и многоводных серий при заданной обеспеченности водоотбора; установление наличия многолетних трендов — направленных изменений в уровнях или расходах подземных вод, обусловленных влиянием как естественных, так и техногенных факторов; определение оптимальных расчетных обеспеченностей питания подземных вод, гарантирующих восполнение проектного водоотбора; оценку степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод. При анализе и обобщении имеющихся данных режима подземных вод на этой стадии нередко требуется: обосновать возможности наращивания коротких рядов наблюдений по корреляционным связям с гидрометеорологическими факторами; установить зависимости амплитуд колебаний уровней подземных вод от глубин их залегания и литологии водовмещающих пород как основы для прогноза возможного

изменения режима и баланса (естественного восполнения) в процессе эксплуатации подземных вод; охарактеризовать изменчивость качества подземных вод во времени.

2. Обеспечение моделей, создаваемых для региональных оценок запасов подземных вод, необходимой исходной информацией и в том числе: характеристикой распределения в пространстве полей напоров и возможных их изменений во времени; возможностью уточнения расчетных гидрогеологических параметров по моделируемому региону в целом на основе решения обратных задач, а затем решением на модели прямой прогнозной задачи; количественной информацией о воздействии на количество и качество подземных вод различных хозяйственных мероприятий.

3. Определение баланса подземных вод региона как одной из форм оценки прогнозных ресурсов подземных вод и одного из способов обоснования достоверности создаваемой региональной модели. Как известно, подбор и обоснование расчетных моделей эпигнозным моделированием могут осуществляться на основе данных наблюдений за естественным режимом подземных вод, так как они обосновываются воднобалансовыми расчетами. Такой вариант решения обратных задач, по данным И.К. Гавич [7], требует минимальных корректировок. Осуществление всех этих видов исследований может повысить точность и достоверность региональных оценок запасов подземных вод.

Решение этих задач возможно с помощью как имеющейся государственной региональной опорной наблюдательной сети, так и специально созданной сети для целей контроля и охраны подземных вод от истощения и загрязнения.

ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНОЙ СТАДИИ ИЗЫСКАНИЙ В РАЙОНАХ ВОДОЗАБОРОВ

Детальное изучение режима на месторождениях подземных вод нередко проводится уже в стадию поисков и предварительной разведки. Однако оно осуществляется главным образом на стадии детальной разведки. При этом изучается преимущественно естественный или слабо нарушенный режим. В различных природных условиях, а также в зависимости от принятого метода оценок запасов подземных вод задачи исследований могут несколько видоизменяться, однако наиболее общими из них являются следующие:

1) оценка возможных колебаний уровней подземных вод для определения минимальной обеспеченности расчетных мощностей водоносного горизонта;

2) оценка восполнения запасов или питания подземных вод в естественных условиях и прогноз его изменения во времени;

3) определение по данным наблюдений за режимом подземных вод степени гидравлической связи с рекой в условиях как стационарного, так и нестационарного режима фильтрации;

4) характеристика изменчивости во времени качества подземных вод (физических свойств и химического состава) и прогноз его возможной изменчивости при эксплуатации;

5) определение по данным наблюдений за режимом подземных вод различных гидрогеологических параметров (уровне- и пьезопроводности пластов, водоотдачи, коэффициента упругоемкости пласта);
6) изучение взаимосвязей режима подземных вод с определяющими его факторами с целью обоснования способа наращивания коротких рядов наблюдений, изучения взаимосвязей водоносных горизонтов и оценки баланса подземных вод участка;
7) определение объемов возможной инверсии родников или скрытой разгрузки подземных вод на испарение при эксплуатации и др.

Наблюдения за режимом подземных вод должны способствовать получению исходных данных по площади для уточнения параметров и границ модели.

Наблюдательная сеть на участках поисков и разведки подземных вод, как правило, создается вновь. Однако, к сожалению, после завершения детальной разведки она часто консервируется или ликвидируется и затем создается заново лишь в начале эксплуатации водозабора. Здесь важно было бы сохранять эту сеть и продолжать наблюдения по ней, что позволит получить дополнительную, а может быть, и новую информацию об условиях формирования подземных вод уже к началу работы водозабора.

ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА СТАДИИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Число водозаборов, по опыту эксплуатации которых проводится переоценка запасов подземных вод, со временем возрастает. С одной стороны, это обусловлено тем, что большая часть городов страны снабжается целиком или частично за счет подземных вод, и при неизбежном со временем увеличении потребности их в воде на перспективу необходимо будет определить потенциальные возможности существующего источника водоснабжения и лишь затем ставить вопрос об изыскании новых или расширении действующих водозаборов. С другой стороны, известно, что, несмотря на постоянное совершенствование методик и техники оценок запасов подземных вод, точность таких оценок нередко еще весьма невысокая. Причины неточностей гидрогеологических расчетов бывают как субъективными, заложенными в выбранной условно расчетной схеме или тенденциозном подборе параметров, так и вполне объективными — обусловленными невозможностью определить в период изысканий достаточно точно параметры и граничные условия. Так, например, условности расчетов определяются субъективным спрямлением криволинейных границ пластов, усреднением расчетных параметров с выбраковкой аномально высоких и низких значений, пренебрежением сезонными и многолетними колебаниями уровней, размещением расчетных скважин по строгим схемам (линейным, кольцевым). Кроме того, эти условности могут определяться пренебрежением некоторыми видами привлекаемых ресурсов (испарением, дополнительным питанием, перехватываемым за счет смещения водоразделов, отжатием воды из глин, не учетом возможного изменения инфильтрационного питания при орошении, принятием водоносных

горизонтов однородными по строению при их реальной многослойности, заменой в расчетах напорно-безнапорных условий напорными или безнапорными, заданием границ с $Q = 0$ на контактах с менее проницаемыми отложениями и др.

Существует серия и вполне объективных причин условности гидрогеологических расчетов. Так, во многих случаях в процессе детальных разведочных работ разумными объемами исследований практически невозможно достоверно оценить перетекание из смежных водоносных горизонтов, установить изменчивость во времени степени гидравлической связи с рекой на всем протяжении месторождения или тем более во всем моделируемом регионе, определить усредненные параметры в пределах возможной воронки депрессии и изменчивость этих параметров во времени и др. В большинстве случаев принимаемые в расчет параметры и граничные условия выбираются с некоторым запасом прочности в оценках эксплуатационных запасов подземных вод. В частности, выполняемые исследования по моделированию работы водозаборных сооружений в сложных гидрогеологических условиях проводятся со значительными запасами прочности в понижениях уровней (при осторожной схематизации граничных условий). Так, по данным И.К. Гавич, в слабопроницаемых породах, контактирующих с эксплуатируемым водоносным горизонтом, может формироваться значительная (до 60–70 %) доля эксплуатационных запасов подземных вод даже при соотношении коэффициентов фильтрации пород свыше 100. Аппроксимация контакта с такими породами непроницаемой границей способна завысить расчетные понижения в 2–5 раз и более. Влияние литологических и тектонических зон, а также переход из напорных условий в безнапорные или напорно-безнапорные может проявиться лишь через несколько лет, причем количественную роль данных факторов и условий можно установить лишь на моделях и длительными режимными наблюдениями.

Наряду с подобным занижением запасов подземных вод в ряде случаев принимаемые волевым порядком допущения невозможно оценить даже по знаку вероятных отклонений от реальности, а в итоге трудно определить, приведут ли они к завышению или занижению запасов подземных вод.

В условиях ограниченности водных ресурсов занижение и завышение запасов подземных вод крайне нежелательны. Занижение запасов подземных вод приводит к замораживанию значительных материальных средств, вложенных в разведку месторождения, снижению эффективности этих работ и может привести к напрасной трате дополнительных средств на изыскание новых источников водоснабжения при неполном использовании уже разведанных и осваиваемых месторождений. Завышение запасов подземных вод грозит оставить населенные пункты и промышленные объекты без воды раньше предусмотренных расчетом сроков. Анализ формирующейся в процессе эксплуатации реальной воронки депрессии, скоростей ее развития при реальном режиме водоотбора позволит уточнить обобщенные по площади расчетные параметры, оценить реальную роль границ пластов, определить происходящие изменения в качестве подземных вод, выявить различные экологические последствия водоотбора и его

влияние на среду. Таким образом, анализ опыта эксплуатации представляет собой важнейший элемент гидрогеологических исследований, необходимый не только для переоценки запасов подземных вод на конкретных локальных участках на качественно новом уровне, он может также послужить и для обоснования построения региональных моделей и выработки мероприятий по охране подземных вод от истощения и загрязнения, рациональному использованию подземных вод, приводящему к минимальным ущербам в окружающей нас среде.

Этот вид исследований режима подземных вод является составной частью стадии эксплуатационной разведки подземных вод, назначением которой, по Н.И. Плотникову [35], является переоценка запасов подземных вод, включая: перевод запасов низких категорий в высокие; доразведку месторождений на флангах; обоснование по данным наблюдений за режимом подземных вод рациональных конструкций водозаборных скважин и их размещение в целях более полного использования эксплуатационных возможностей водоносного горизонта; оценку и предупреждение специальными мерами ухудшения качества подземных вод во времени; гидрогеологическое обоснование искусственного восполнения запасов подземных вод.

Данные наблюдений за режимом подземных вод на типичных водозаборах могут послужить также аналогом для прогнозных оценок режима подземных вод в других районах.

В сложных гидрогеологических условиях (при значительной плановой и вертикальной неоднородности, например, в карстовых массивах) данные опыта эксплуатации могут оказаться единственно возможной достоверной основой для уточнения расчетных параметоров, прогноза изменения водоотбора во времени, обоснования мер по управлению водоотбором и его регулированием. Несмотря на то что особенно интенсивно воронка депрессии развивается в первые годы эксплуатации, ее развитие все же существенно зависит от времени эксплуатации и поэтому с вовлечением в зону воздействия водозабора все новых и новых участков средние расчетные параметры постоянно меняются. В результате их уточнение должно быть постоянным, что входит в задачу стационарной наблюдательной сети. Очень важным является прогноз изменения качества подземных вод за счет подсоса соленых, загрязненных или некондиционных по каким-либо показателям вод (морских, болотных, бытовых и промышленных стоков, возвратных дренажных, шахтных). Такой прогноз позволяет своевременно обосновать меры борьбы с загрязнением подземных вод в районе водозаборов, например создание барражных водозаборов, ограничение или перераспределение водоотбора, т. е. он может служить основой управления режимом качества подземных вод.

Путем наблюдения за режимом подземных вод в районах водозаборов можно решать на только конкретные практические вопросы, связанные с данным водозабором. Результаты наблюдений могут служить основой рассмотрения различных теоретических и методических задач, представляющих более широкий интерес. Поэтому помимо наблюдений на каждом водозаборе, осуществляемых эксплуатирующими организациями в соот-

ветствии с "Основами водного законодательства СССР и союзных республик", на отдельных типовых водозаборах должны проводиться более детальные и целенаправленные научные исследования для изучения важных в методическом и теоретическом отношении вопросов (изучение законов фильтрации в различных средах, количественная оценка роли различных источников формирования запасов подземных вод, закономерности их изменчивости во времени, изучение и прогноз влияния эксплуатации подземных вод на окружающую среду и др.).

Суммируя вышеизложенное, можно следующим образом определить задачи изучения режима подземных вод на действующих водозаборах:

1) определение и уточнение расчетных гидрогеологических параметров, включая их изменчивость во времени;

2) уточнение роли различных граничных условий в формировании запасов подземных вод;

3) количественная оценка составляющих восполнения запасов подземных вод (естественных и привлекаемых ресурсов подземных вод) и прогноз их изменения в процессе эксплуатации;

4) установление закономерностей режима подземных вод в условиях эксплуатации, обоснование с учетом этих закономерностей рационального режима эксплуатации подземных вод, получение на ключевых участках обобщенных характеристик по эксплуатации подземных вод (эксплуатационных модулей) для осуществления по ним сопоставлений различных месторождений и приближенных оценок эксплуатационных возможностей разведываемых водоносных горизонтов, находящихся в аналогичных гидрогеологических условиях;

5) изучение закономерностей изменчивости качества подземных вод в процессе эксплуатации и его прогноз во времени;

6) контроль за соответствием качества подземных вод ГОСТу на питьевую воду [16] и соответствием объемов эксплуатации установленным эксплуатационным запасам месторождения;

7) изучение эффективности источников искусственного пополнения запасов подземных вод, обоснование мер по усовершенствованию систем искусственного пополнения и определение режима их работы (эти исследования необходимы для уточнения или переоценки эксплуатационных запасов подземных вод по опыту эксплуатации);

8) изучение влияния эксплуатации на окружающую среду и прежде всего на геологическую (просадочные явления, активизация карстовых и карстово-суффозионных процессов), оценка возможных изменений компонентов природной среды (речной сток, биосфера и т. д.), способных нанести ущерб народному хозяйству. Разработка рекомендаций по снижению негативных последствий эксплуатации подземных вод;

9) обоснование направлений режимных исследований на перспективу, размещения необходимой для этого наблюдательной сети, определение необходимого состава наблюдений и особенностей их проведения для решения ставящихся задач;

10) выработка мероприятий по охране подземных вод от истощения и загрязнения, регулированию и управлению режимом подземных вод, опти-

мальному использованию подземных вод, оценка эффективности принятых мер по охране подземных вод;

11) отработка на ключевых водозаборах методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод, методов прогноза режима уровней и качества подземных вод в условиях эксплуатации, обоснование рациональных режимов эксплуатации и искусственного пополнения запасов подземных вод, управления режимом подземных вод.

ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С КОНТРОЛЕМ ЗА ОХРАНОЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОТ ИСТОЩЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Помимо исследований режима подземных вод на конкретных водозаборах (разведываемых и существующих) в последние годы все шире ставится задача изучения режима подземных вод в региональном плане, проводимое также в целях водоснабжения. Для решения задач, связанных с обоснованием рациональных форм использования и охраны подземных вод, требуется изучение режима подземных вод в следующих направлениях:

1) оценка тенденций в многолетней изменчивости ресурсов подземных вод в связи с возможными изменениями климата и направленным влиянием хозяйственной деятельности человека на подземные воды. Подобные представления о ресурсах подземных вод будущего могут способствовать перспективному планированию развития народного хозяйства, определению возможного (за счет подземных вод) водопотребления по отдельным регионам, обоснованию форм рационального использования подземных вод;

2) изучение закономерностей возможного чередования серий мало- и многоводных лет, а также определение среднемноголетних или минимальных многолетних значений восполнения запасов подземных вод для региональных оценок прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод по отдельным крупным водосборным бассейнам, природным регионам или административным территориям;

3) изучение и прогноз влияния различной хозяйственной деятельности человека на ресурсы и качество подземных вод, учет этих воздействий в региональных моделях, используемых для оценок их эксплуатационных запасов;

4) изучение влияния использования подземных вод на общий водный баланс региона (и в первую очередь на поверхностный сток), а также на окружающую среду; оценка доли подземных вод в общих водохозяйственных балансах регионов.

Исследования режима подземных вод для решения перечисленных выше задач могут использоваться не только при региональных оценках ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод в целях перспективного планирования и использования подземных вод, а также при решении конкретных задач водоснабжения населенных пунктов, промышленных объектов или рассредоточенного сельскохозяйственного водоснабжения.

Решение всех этих задач невозможно без продуманной и целенаправленно размещенной наблюдательной сети, а также обоснованного комплекса наблюдений как за режимом подземных вод, так и за серией факторов, определяющих режим подземных вод и взаимосвязанных с ним процессов.

Глава 2
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПРИНЦИПЫ РАЗМЕЩЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

ТИПИЗАЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ И ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ОБЪЕКТА НАБЛЮДЕНИЙ

Важность обоснованного размещения наблюдательной сети для изучения влияния эксплуатации на подземные воды, а также стремление упорядочить принципы размещения наблюдательной сети применительно к различным природным условиям отмечались в работах Е.Л. Минкина, Л.С. Язвина, В.С. Ковалевского, В.Д. Гродзенского, В.М. Гольдберга, Б.В. Боревского и др. С учетом сложившихся на сегодня представлений наблюдательную сеть, существующую в связи с эксплуатацией подземных вод, по своему составу и назначению можно условно подразделить на четыре категории: контрольную, специализированную, опорную ключевую и опорную региональную.

Контрольная сеть в соответствии с водным законодательством СССР должна существовать на каждом водозаборе. Она находится в ведении эксплуатирующей организации и в ее задачи входит систематический контроль за качеством воды, размерами водоотбора, который не должен превышать установленных эксплуатационных запасов, а также за уровнями подземных вод.

Специализированная сеть создается временно при проведении разведочных работ под проектируемый водозабор или для переоценки запасов подземных вод по действующему водозабору. По завершении работ она может быть ликвидирована или передана при необходимости эксплуатирующей организации или территориальной геологической организации, осуществляющей контроль за охраной подземных вод от истощения и загрязнения. Эта сеть создается и находится в период исследований в ведении организации, проводящей данные работы.

Опорная ключевая сеть создается на отдельных типичных или важных в народнохозяйственном отношении водозаборах для контрольно-охранных и исследовательских целей, задачи которых сформулированы в предыдущей главе. Эта сеть находится в ведении специализированных гидрорежимных партий Мингео СССР. Создается она для длительных стационарных наблюдений в качестве основы систематических прогнозов режима подземных вод под влиянием их эксплуатации, для выработки и

оценки эффективности мер по управлению режимом, охраны подземных вод и окружающей среды.

Опорная региональная сеть создается для изучения влияния эксплуатации на режим подземных вод и изменение качества подземных вод в региональном плане. С одной стороны, эта сеть позволяет охарактеризовать тот региональный фон, на котором развивается нарушенный режим, а с другой стороны — оценить масштабы нарушений, вызванных эксплуатацией подземных вод, установить взаимовлияние различных водозаборов, а также масштабы воздействия на подземные воды различной хозяйственной деятельности человека, способной повлиять на количество и качество подземных вод, используемых или потенциально пригодных для использования в будущем в целях водоснабжения. Региональная опорная сеть должна обеспечить гидрогеологов информацией о режиме подземных вод, необходимой для построения моделей для региональных оценок эксплуатационных запасов подземных вод и обоснования форм оптимального и рационального использования ресурсов подземных вод. Эта сеть также находится в ведении Мингео СССР и служит целям контроля и охраны подземных вод.

Принципы размещения этих четырех категорий наблюдательной сети имеют как некоторые общие черты, так и специфические различия, обусловленные назначением сети.

Так, контрольная сеть может и не иметь специальных наблюдательных скважин. Наблюдения в этом случае осуществляются по имеющимся эксплуатационным или резервным скважинам, расположенным в пределах водозаборного сооружения. Специальные наблюдательные скважины целесообразно иметь здесь для контроля за техническим состоянием эксплуатационных скважин (оценки зарастания фильтров) и получения представления об истинном положении уровней подземных вод в центре водозабора. Для этого можно ограничиться минимальным числом скважин. Например, при площадном и кольцевом расположении эксплуатационных скважин целесообразно иметь одну-две наблюдательные скважины внутри большого колодца — в его центре и на расстоянии радиуса. При линейном расположении скважин также достаточно иметь одну скважину в центре ряда и вторую — в его конце (или на обоих концах).

В тех случаях, когда водозабор представляет собой несколько изолированных групп эксплуатационных скважин, наблюдательные скважины целесообразно иметь в центре каждой из таких групп.

Размещение специализированной и опорной наблюдательной сети должно осуществляться с учетом:

1) закономерностей формирования режима подземных вод и особенностей источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод в различных природных условиях;

2) задач, ставящихся перед наблюдениями применительно к конкретным природным и народнохозяйственным условиям;

3) методов, которыми будут решаться эти задачи.

Именно эти три основные категории условий в сочетании определяют все особенности наблюдательной сети и специфику программ наблюдений.

Помимо этого для выбора ключевых участков имеют также значение представительность (типичность) объекта, его народнохозяйственная, социальная и экологическая значимость, т. е. учет степени опасности выхода водозабора из строя и возможности нанесения его работой крупного материального ущерба хозяйству или окружающей среде. В частности, создание опорной ключевой наблюдательной сети может быть рекомендовано в следующих случаях.

1. На крупных водозаборах, имеющих большое практическое значение и отбирающих большое количество воды, измеряемое иногда сотнями тысяч кубических метров в сутки. Как правило, такие водозаборы располагаются в районах крупных городов. Воронка депрессии в таких условиях, независимо от степени водообеспеченности территории (т. е. даже в самых благоприятных условиях), постоянно растет. С ростом ее не только изменяются расчетные гидрогеологические параметры (средние для зоны влияния водозабора), но и начинают сказываться новые граничные условия, определяющие характер развития воронки. В таких условиях постоянно должны вноситься поправки в параметры, уточняться прогнозы развития воронки, а также производиться переоценка запасов подземных вод. Помимо этого, крупные водозаборы с их огромными воронками депрессии нередко взаимодействуют между собой и влияют в какой-то мере на режим подземных вод артезианских бассейнов в целом, что также требует изучения.

2. На водозаборах, где в силу того, что водоотбор превышает восполнение запасов водоносного горизонта, идет невосполнимая сработка запасов, т. е. наблюдается постоянное снижение уровней подземных вод. В эту категорию водозаборов могут попасть не только крупные, но и небольшие водозаборы. Из-за угрозы неизбежного истощения запасов водоносного горизонта необходимо организовать наблюдательную сеть и на таких водозаборах, чтобы по данным этих наблюдений можно было бы оценить или уточнить эксплуатационные запасы подземных вод, определить сроки работы водозабора при современных размерах водоотбора или при каком-то определенном темпе его увеличения. Такие наблюдения и сделанные по ним расчеты помогут своевременно поставить вопрос об изыскании других источников водоснабжения либо принять меры к более рациональному использованию существующих.

3. На водозаборах, где в результате их эксплуатации может произойти ухудшение качества подземных вод. Особое значение такая наблюдательная сеть имеет на водозаборах питьевого назначения, расположенных вблизи морских побережий, очагов загрязнений, контактов с некондиционными природными водами.

4. На водозаборах, где в результате интенсивной эксплуатации подземных вод могут произойти существенные нарушения в окружающей среде (активизация карстовых процессов, просадки земной поверхности, угнетение растительности), которые способны нанести ущерб народному хозяйству.

5. На водозаборах, работающих в условиях искусственного пополнения, где по данным наблюдений необходимо постоянно оценивать эффективность пополнения и управлять этим процессом.

6. На водозаборах, расположенных в сложных гидрогеологических условиях, когда в процессе разведки практически невозможно было оценить достоверно ни расчетные параметры, ни источники формирования подземных вод.

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

Специфика размещения специализированной и опорной наблюдательной сети определяется прежде всего гидрогеологическими условиями, которые обусловливают и особенности формирования запасов подземных вод и специфику задач, возникающих при их оценках.

По особенностям формирования эксплуатационных запасов подземных вод месторождения подземных вод можно подразделить на следующие основные группы: 1) артезианских бассейнов платформенного типа; 2) межгорных впадин, предгорных шлейфов и конусов выноса; 3) речных долин; 4) зандровых и флювиогляциальных равнин; 5) массивов песчаных пустынь и полупустынь; 6) трещинно-карстовых пород, ограниченных структур и локализованных водосборных бассейнов; 7) областей развития многолетнемерзлых пород.

Рассмотрим особенности размещения наблюдательной сети в каждой из этих групп.

ВОДОЗАБОРЫ В АРТЕЗИАНСКИХ БАССЕЙНАХ ПЛАТФОРМЕННОГО ТИПА

Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в артезианских бассейнах являются:

1) упругие запасы подземных вод (на первом этапе эксплуатации), а при снижении напоров ниже кровли пласта — гравитационные запасы;

2) естественные запасы и ресурсы смежных водоносных горизонтов, поступающие к водозабору путем перетекания как через разделяющие слои, так и по гидрогеологическим окнам;

3) естественные запасы подземных вод разделяющих слоев;

4) естественные ресурсы эксплуатируемого водоносного горизонта (особенно вблизи областей питания) и разгрузки водоносных горизонтов.

При размещении наблюдательной сети в районах водозаборов в артезианских бассейнах платформенного типа необходимо учитывать некоторые особенности этих бассейнов.

1. Значительную площадь распространения водоносных горизонтов, наличие нескольких областей питания и разгрузки подземных вод, а также формирующиеся при эксплуатации подземных вод обширные (измеряемые десятками километров) воронки депрессии.

2. Наличие в этих бассейнах комплекса этажно-расположенных водоносных горизонтов с самостоятельными областями питания и разгрузки. Эти водоносные горизонты разделены выдержанными по площади слабопроницаемыми породами. Однако нередко имеют место гидрогеологические окна, через которые осуществляется гидравлическая связь между

горизонтами. Поэтому при размещении сети необходимо учитывать возможность перетекания и взаимодействия водоносных горизонтов, которое проявляется в естественных условиях и особенно усиливается в процессе эксплуатации. С одной стороны, это явление может привести к изменению качества эксплуатируемых вод во времени и отрицательно сказаться на эксплуатационных запасах подземных вод, с другой — увеличение размеров перетекания приведет к стабилизации воронки депрессии.

3. Мощность водоносных горизонтов нередко достигает значительных размеров. Фациальная изменчивость в пределах таких водоносных горизонтов, а также различие в степени трещиноватости или проницаемости отложений могут обусловить резкое различие фильтрационных свойств и режима подземных вод разных частей одного и того же горизонта.

4. Увеличение глубин залегания водоносного горизонта по мере удаления от областей его питания приводит, как правило, к постепенному увеличению общей минерализации подземных вод, а следовательно, и возможности подтягивания соленых вод к водозабору из более глубоких частей горизонта.

5. Значительные величины напоров в областях циркуляции водоносных горизонтов и нередко свободная поверхность подземных вод в областях питания и разгрузки горизонтов. Влияние климатических и гидрологических факторов на естественный режим напорных вод проявляется лишь в областях их питания и разгрузки. В областях напора (или циркуляции) изменения в режиме чаще всего связаны лишь с влиянием эксплуатации, передачей давления из указанных выше областей или за счет кажущихся колебаний уровней подземных вод под влиянием изменений атмосферного давления.

В соответствии с отмеченными выше особенностями этих бассейнов могут быть выделены следующие различные условия на границах пластов, а следовательно, и расчетные схемы, на основе которых размещается сеть наблюдательных скважин.

В разрезе

А. Водоносный пласт изолирован от выше- и нижележащих водоносных горизонтов мощными слоями водоупорных глинистых отложений (перетекание отсутствует).

Б. Водоносный пласт связан с выше- и нижележащими водоносными горизонтами, отмечается перетекание воды через слабопроницаемые слои.

В. Водоносный пласт связан с другими горизонтами через гидрогеологические окна, переуглубленные долины или по зонам дробления.

В плане

А. Водозаборы заложены в центральных частях бассейнов, где пласт может рассматриваться как неограниченный.

Б. Водозаборы заложены вблизи крупных дрен (рек, морей), подземные воды изучаемого горизонта гидравлически связаны с этими дренами; в таких случаях пласт рассматривается как полуограниченный.

В. Водозаборы заложены в областях питания водоносного горизонта вблизи контура выклинивания водоносного горизонта или вблизи границы с резкой сменой литологических разностей водовмещающих пород; в этих условиях пласты рассматриваются так же, как полуограниченные.

Основные специфические задачи изучения режима подземных вод в артезианских бассейнах платформенного типа следующие.

1. Оценка основных расчетных параметров водоносных горизонтов и запасов подземных вод в условиях постоянно развивающейся и углубляющейся воронки депрессии.

2. Оценка условий взаимосвязи водоносных горизонтов (т. е. оценка размеров перетекания или отжатия воды из глин) и влияния других граничных условий (реки, области питания) на характер развития воронки депрессии, а следовательно, и на режим подземных вод.

3. Оценка возможности подтока соленых вод из нижележащего водоносного горизонта или из более глубоких частей эксплуатируемого горизонта и прогноз возможной изменчивости качества подземных вод.

4. Выяснение условий взаимосвязи различных водозаборов.

5. Оценка возможных последствий эксплуатации — просадок земной поверхности, активизации карстовых процессов и др.

Для размещения наблюдательной сети в соответствии с указанными расчетными схемами и задачами необходимо получить представление об основных расчетных гидрогеологических параметрах — коэффициентах водопроводимости, перетекания и главным образом пьезопроводности пласта, определяющих возможное развитие воронки депрессии во времени. Данные об этих параметрах могут быть получены на основании материалов разведки на изучаемом или аналогичном водозаборе, либо по данным наблюдений за снижением или восстановлением уровней после временной остановки отдельных скважин действующего водозабора.

Выбор числа наблюдательных скважин определяется граничными условиями водозабора. Так, для водозабора, расположенного в центральной части бассейна, т. е. в неограниченном пласте, гидравлически не связанном с другими водоносными горизонтами при однородном строении пласта (при наиболее часто встречаемой схеме площадного расположения эксплуатационных скважин), должно быть минимально два взаимопересекающихся створа скважин по 4—6 скважин в каждом луче. Одна наблюдательная скважина располагается в центре воронки депрессии, а последующие — на расстояниях $0{,}5R$; R и $2R$ от нее, где R — радиус "большого колодца". Пятую скважину целесообразно разместить на расстоянии примерно 0,3—0,5 радиуса воронки депрессии, а шестую — вблизи ее границы (рис. 1, *а*).

Как известно, понижение уровня в эксплуатационной скважине, расположенной в центре "большого колодца", определяется суммой понижений, вызванных как системой скважин в целом, так и дополнительного понижения в отдельных скважинах, зависящего от расположения скважин внутри системы, их несовершенства и нагрузки на каждую скважину. Поэтому первые три наблюдательные скважины, наряду с замерами по эксплуатационным скважинам, в сумме должны охарактеризовать положение уровня внутри самого водозабора. Четвертая и пятая скважины, расположенные за пределами влияния каждой эксплуатационной скважины в отдельности, позволяют оценить обобщенные параметры пласта при работе водозабора как "большого колодца". И, наконец, последняя, шестая, скважина должна охарактеризовать режим подземных вод в

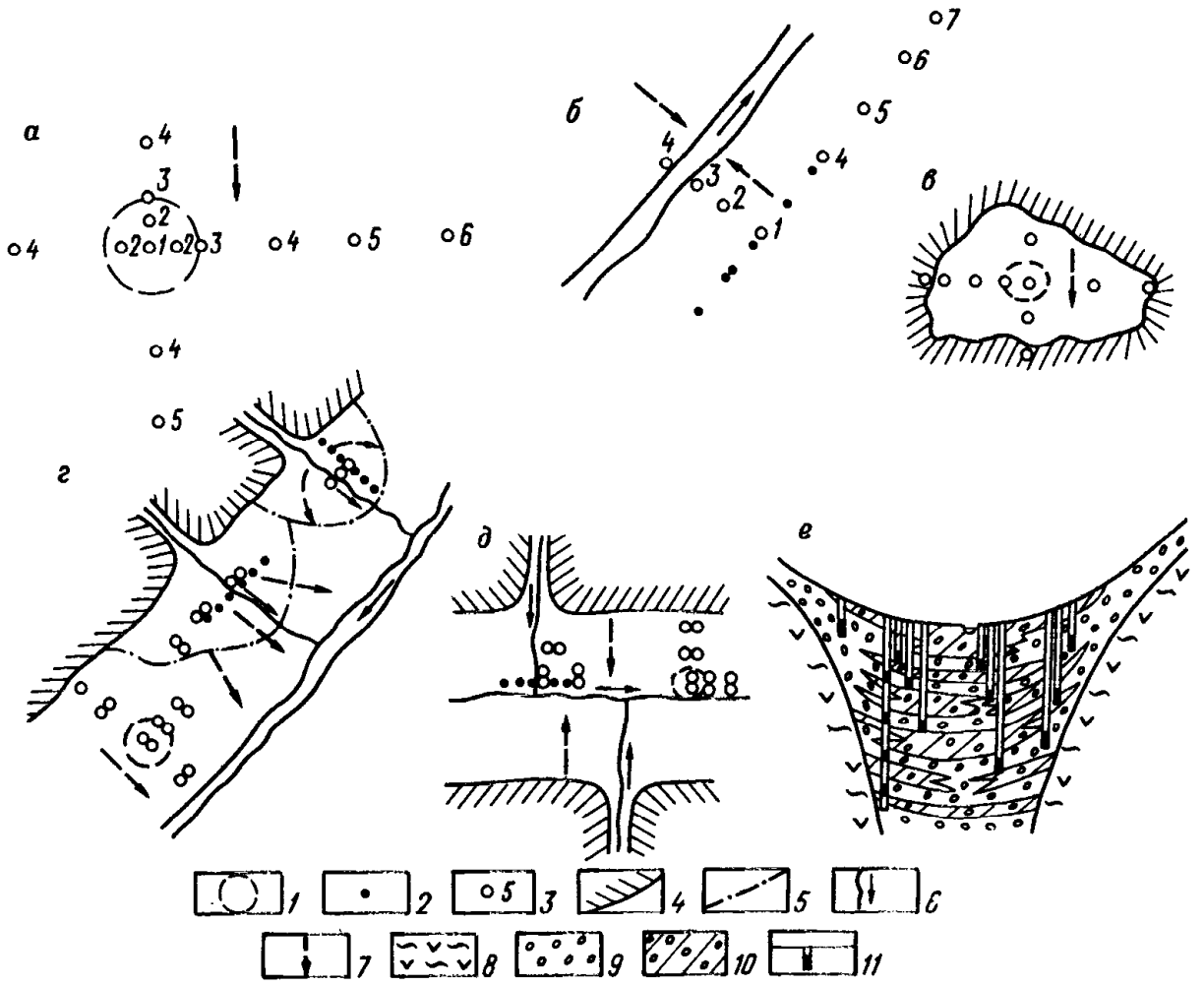


Рис. 1. Схемы размещения наблюдательной сети в районах водозаборов, расположенных:

а — в центральных частях артезианских бассейнов; *б* — в зоне взаимосвязи напорного пласта с рекой; *в* — в мульдах, котловинах и грабенах; *г* — на предгорных шлейфах и конусах выноса; *д* — е — в межгорных долинах. *1* — контур "большого колодца"; *2* — эксплуатационная скважина; *3* — наблюдательная скважина и ее номер; *4* — контур слабопроницаемых отложений; *5* — контур конуса выноса; *6* — направление течения рек; *7* — направление потока подземных вод; *8* — слабопроницаемые трещиноватые породы; *9* — галечники с супесчаным заполнителем; *10* — суглинки с галькой; *11* — скважина с фильтром

естественных или слабонарушенных условиях, т. е. как бы режим статического уровня, от которого отсчитываются величины понижения. При линейном размещении эксплуатационных скважин четвертая наблюдательная скважина располагается на расстоянии, превышающем половину длины водозаборного ряда. При больших глубинах и, следовательно, высокой стоимости бурения наблюдательные скважины 2, 3, 5 и 6 могут закладываться не на каждом луче, а на одном-двух из них. Таким образом, минимальное число скважин составит 9—10 штук. Ориентирование лучей скважин в наиболее общем случае осуществляется вдоль и поперек потока. Однако створы скважин можно заложить в направлении зон, где возможно изменение фильтрационных свойств пласта или изменение условий взаимосвязи со смежными горизонтами (например, в сторону долины реки, ближайшего водораздела или гидрогеологического окна, где осуществляется или может начаться подпитывание напорного горизонта).

При наличии взаимовлияния различных водозаборов в пределах артезианского бассейна створы или специальные дополнительные скважины должны быть сориентированы в направлении таких водозаборов.

Если водозабор состоит из нескольких групп сосредоточенных скважин, каждая из которых может быть обобщена в виде "большого колодца", то необходимо заложить наблюдательные скважины между такими группами.

Для водозаборов, работающих в условиях перетекания, расстояния r от центра водозабора до наблюдательных скважин, закладываемых за пределами "большого колодца", должны быть скорректированы возможным коэффициентом перетекания [11]. При этом для ближайшей четвертой скважины должно сохраняться условие $1{,}5R < r < 1{,}12B$, где B – коэффициент перетекания. Во всех случаях одну из скважин следует закладывать на $t > B$, т. е. в естественных условиях. Последняя скважина в перспективе позволит оценить возможное изменение радиуса влияния водозабора и коэффициента перетекания, если будут нарушены условия постоянства уровней в вышележащем горизонте. При оценках запасов подземных вод, принимая важность учета, сохранения или изменчивости уровней подземных под в смежных водоносных горизонтах, необходимо заложить на эти горизонты по одной-две скважины – в центре воронки депрессии и столько же на расстоянии $1{,}0–1{,}5R$ от центра. В случаях, когда ставится задача изучить перетекание и его возможные изменения во времени по геофизическим данным, бурится дополнительная скважина на разделяющий слой. Эта скважина может быть соединена со смежными горизонтами, но изолирована от эксплуатируемого и использоваться для измерений уровней в соседних горизонтах и расчета потока тепла в разделяющем слое при помощи датчиков пластового давления и температуры. По градиенту стационарного теплового потока (его величине и знаку), определяемого замерами температур в трех-четырех точках разделяющего слоя, определяется скорость вертикальной фильтрации или перетекания [4, 39 и др.].

При размещении наблюдательной сети в полуограниченных пластах, например, когда водоносный пласт гидравлически связан с рекой или озером, являющимся контуром питания горизонта с "постоянным напором" на границе, основной створ, состоящий минимум из четырех скважин, закладывается в сторону реки или озера (см. рис. 1, *б*). Первая из скважин в этом створе закладывается в центре воронки депрессии; вторая – на расстоянии $0{,}5l$ от нее по направлению к реке, где l – расстояние между рекой и водозабором; третья – у реки и четвертая, если это необходимо, за рекой. Две последние скважины закладываются, чтобы оценить возможность снижения напоров подземных вод ниже урезов поверхностных вод, а также для учета направления и расхода потока подземных вод. Если длина водозабора в 2–3 раза меньше расстояния до реки, водозабор может схематизироваться как "большой колодец".

Для более полной характеристики развития воронки депрессии можно дополнительно заложить второй наблюдательный створ, перпендикулярно к первому, также состоящий из нескольких скважин, причем скважины

5 и 6 закладываются в пределах воронки депрессии, а скважина 7 — в естественных условиях.

Для водозаборов, расположенных вблизи морских побережий, схема размещения наблюдательных скважин может быть такой же, как у реки или озера. Однако, учитывая особую важность изучения режима подземных вод в районе моря, со стороны которого возможен подток соленых вод, необходимо создать наблюдательную сеть на ближайших островах и косах (если таковые имеются) для оценки характера развития воронки депрессии в море.

Если водозабор расположен вблизи области питания или выклинивания водоносного горизонта, а также вблизи границ с резкой сменой литологического состава водовмещающих пород (что также соответствует расчетной схеме "полуограниченного пласта" с постоянным расходом на контуре питания), наблюдательные скважины размещаются двумя створами: один в сторону "непроницаемой" границы или области питания, другой — перпендикулярно к этому направлению.

В условиях гидравлической связи основного водоносного горизонта с выше- и нижележащими горизонтами, т. е. при перетекании, особенно в случаях, когда эта связь может привести к изменению качества вод основного эксплуатируемого водоносного горизонта, необходимо закладывать скважины не только в основном, но и в связанных с ним водоносных горизонтах. Кроме того, скважины по возможности следует совмещать в одних и тех же точках со скважинами на основной горизонт, создавая таким образом кусты скважин. В горизонтах, связанных с основным горизонтом, можно заложить на одну скважину меньше (без скважины за пределами воронки депрессии).

При наличии гидравлической связи основного водоносного горизонта с другими через гидрогеологические (гидравлические) окна необходимо также заложить створы из двух-трех скважин по направлению от центра воронки депрессии до указанных окон.

В случаях, когда водоносный пласт замещается непроницаемыми или слабопроницаемыми породами не по прямолинейному, а по какому-то криволинейному контуру, расчетная схема может быть сведена к схеме "пласт—квадрант". Наблюдательная сеть в таких условиях создается в виде створов по направлению к "непроницаемым" контурам и в сторону области питания пласта.

Встречаются водозаборы, расположенные в областях питания напорных вод, где водовмещающие породы не имеют непосредственного выхода на поверхность и перекрыты толщей четвертичных или каких-либо других коренных отложений, содержащих грунтовые или межпластовые безнапорные воды. Питание напорных вод в этих условиях осуществляется главным образом за счет перетекания подземных вод из вышележащих грунтовых вод. Эксплуатация подземных вод при небольшом водоотборе в таких условиях приводит нередко к стабилизации уровней, обеспечиваемой перетеканием из вышележащих грунтовых вод. Однако увеличение размеров водоотбора приводит к нарушению равновесия.

При размещении наблюдательной сети в этих условиях необходимо предусматривать наблюдательные скважины в самом эксплуатируемом водоносном горизонте и в вышележащих с тем, чтобы иметь возможность оценить характер развития воронки депрессии как в том, так и в другом горизонтах. При этом необходимо иметь в виду, что снижение уровней в вышележащем (взаимодействующем) горизонте может проявиться далеко не сразу, а через определенное время.

Для артезианских бассейнов, приуроченных к мульдам, небольшим впадинам или грабенам древних пенепленизированных геосинклинальных зон, размеры которых соизмеримы с размерами воронок депрессии, наиболее часто расчетной схемой будет "пласт—круг". Опыт наблюдений за режимом подземных вод в этих бассейнах (например, в Михайловской мульде Северного Казахстана) показывает, что влияние эксплуатации сказывается по всей мульде, т. е. воронка депрессии быстро достигает границ пласта. Запасы подземных вод таких структур крайне ограничены, в результате чего интенсивная их эксплуатация приводит к истощению подземных вод. Быстрое развитие воронки депрессии до границ пласта приводит также к подтоку соленых вод, что ставит под угрозу качество вод эксплуатируемого водоносного горизонта.

Наблюдательная сеть в таких бассейнах проектируется как в областях питания, так и по всему бассейну с учетом граничных условий в плане и в разрезе.

В мульдах, впадинах или грабенах ограниченных размеров, длина которых не превышает ширину более чем в 3—5 раз, водоносный горизонт может быть схематизирован как "пласт—круг" с приведенным радиусом $R=\sqrt{\frac{F}{\pi}}$, где F — площадь котловины или мульды.

Особенности размещения наблюдательных скважин в районе водозабора зависят от того, находится ли водозабор в центре мульды или располагается ближе к одному из его контуров.

При размещении водозабора в центре бассейна наблюдательная сеть проектируется из трех-четырех скважин по каждому из выбранных направлений. При этом первый створ, проходящий через центр воронки депрессии, закладывается от областей питания до областей разгрузки. Расположение скважин производится с учетом возможной оценки по ним подтока соленых вод из глубоких частей водоносного горизонта, а также размеров питания водоносного горизонта. Единичные скважины желательно заложить дополнительно в обрамляющий водоносный горизонт, подпитывающий рассматриваемый бассейн подземных вод (см. рис. 1, *в*).

В случаях, когда водозабор располагается не в центре мульды, следует закладывать минимально два наблюдательных створа: первый — по кратчайшему расстоянию к ближайшей границе, а второй — к центру мульды. Первый из них состоит из трех-четырех скважин. При наличии гидравлической связи с нижележащим горизонтом и грунтовыми водами проектируются дополнительные скважины для оценки степени этой связи.

Как уже отмечалось выше, интенсивная эксплуатация подземных вод приводит к оседаниям дневной поверхности, что вызывается изменением

состояния как водовмещающих, так и разделяющих слоев. Снятие взвешивающего гидростатического давления увеличивает силы тяжести и приводит к уплотнению рыхлых отложений. Наблюдения за этим явлением представляют практический интерес и должны сопровождаться наблюдениями за режимом подземных вод. Наблюдения за данным явлением могут осуществляться либо по специально оборудованным геодезическим реперам, либо путем периодической нивелировки устьев наблюдательных скважин, о чем будет сказано ниже. Принципы размещения таких реперов должны быть аналогичны принципам размещения наблюдательных скважин в артезианских бассейнах.

ВОДОЗАБОРЫ В БАССЕЙНАХ МЕЖГОРНЫХ ВПАДИН, НА ПРЕДГОРНЫХ ШЛЕЙФАХ И КОНУСАХ ВЫНОСА

Месторождения этой группы, несмотря на разнородность гидродинамических условий (напорных, напорно-безнапорных и безнапорных), достаточно однотипны по гидрогеологическому строению и условиям формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Поэтому лишь условно эту группу месторождений подземных вод можно подразделить на: 1) предгорные бассейны, включая артезианские склоны, конусы выноса и пролювиальные шлейфы; 2) межгорные бассейны, включая замкнутые впадины или межгорные долины.

Предгорные бассейны содержат часто огромные запасы подземных вод и поэтому имеют большое практическое значение. Сложены они щебнистым и галечниковым материалом, который по мере удаления от гор все более и более расчленяется прослоями глин и суглинков на несколько обычно хорошо гидравлически взаимосвязанных и невыдержанных по площади водоносных горизонтов. Безнапорные условия сменяются напорными с различными, чаще всего увеличивающимися с глубиной напорами. Мощность отложений увеличивается по мере удаления от гор и может составить несколько сотен метров. Минерализация воды возрастает с глубиной и по мере удаления от гор. Питание подземных вод предгорных бассейнов осуществляется непосредственно за счет атмосферных осадков, инфлюации поверхностных вод в верхних частях конусов выноса, где эти отложения выходят на поверхность, и подтока вод из подстилающих их коренных отложений. Разгрузка подземных вод происходит родниковым стоком, путем подземного оттока в сторону межгорных впадин и долин, а также за счет испарения.

Эксплуатационные запасы подземных вод в предгорных бассейнах формируются за счет перехвата естественной разгрузки, фильтрационных потерь из оросительных каналов и на массивах орошения, перетекания и в меньшей степени за счет инфильтрационного питания и осушения пласта.

Принимая во внимание, что водоносные прослои в указанных многослойных толщах, как правило, не выдержаны ни в плане, ни в разрезе, чаще всего маломощны и гидравлически тесно взаимосвязаны, эксплуатационные скважины обычно закладывают сразу на несколько (от двух до пяти) водоносных горизонтов или прослоев. В единой колонне с фильт-

рами на разные водоносные горизонты (прослои) производятся опытные опробования в период поисков и разведки месторождений.

Другой особенностью эксплуатации является линейное расположение эксплуатационных скважин, что определено стремлением перехватить либо поток, направленный от предгорий к долине по крупным или слившимся конусам выноса и предгорным шлейфам, либо фильтрационные потери из рек, выходящих из гор на предгорную равнину. В соответствии с этим водозаборы закладываются параллельно горам (вдоль основной долины), реже — поперек основной долины и вдоль ее притоков (см. рис. 1, *г*). Ввиду частой засоленности и загрязненности грунтовых вод основными эксплуатируемыми горизонтами являются напорные.

Граничные условия в зависимости от размеров водозабора и его местоположения могут быть различными. При сравнительно малом водоотборе, а также в силу значительной водообильности отложений и обильном естественном и искусственном питании подземных под воронка депрессии развивается в пределах ограниченных площадей. В этих случаях наблюдательная сеть может создаваться так же, как и в артезианских бассейнах, по схеме неограниченного изолированного пласта или по схеме с перетеканием (см. рис. 1, *г*).

При расположении водозабора вблизи выклинивания водоносного горизонта (замещения его слабопроницаемыми осадками, например, при сочленении аллювиально-пролювиальных и коренных отложений), наблюдательная сеть должна создаваться как для "полуограниченного" пласта с контуром постоянного напора на границах (см. рис. 1, *г* и *д*).

Наблюдательные скважины в многослойных толщах при эксплуатации сразу нескольких водоносных прослоев следует оборудовать на те же горизонты, которые эксплуатируются. Однако в целях выявления доли участия отдельных слоев в формировании водоотбора, целесообразно заложить единичные скважины отдельно на основные водоносные прослои. Одновременно закладываются скважины и на горизонты, перетекание из которых определяет восполнение запасов подземных вод.

Створы скважин закладываются также поперек и вдоль потока или вдоль и перпендикулярно к границам пласта. Во всех случаях, помимо скважины в центре воронки депрессии, одна-две скважины закладываются внутри "большого колодца" (в центре ряда и на его конце) и за пределами "большого колодца" на расстоянии $r > 1{,}5R$ или $r > 0{,}5L$ (где L — длина водозабора). При наличии гидравлической связи эксплуатируемого водоносного горизонта или комплекса с рекой наблюдательные скважины устанавливаются у реки и за рекой.

При расположении водозабора вблизи границы частичного выклинивания предгорного потока подземных вод основной створ из двух-трех скважин оборудуется перпендикулярно к этой границе. Организуются наблюдения и за родниками в зоне выклинивания в целях оценки их инверсии, а также за расходами рек, за счет которых идет питание подземных вод. Минимум одна скважина закладывается в зоне возможного снятия испарения.

Межгорные артезианские бассейны, как правило, тесно связаны с предгорными, являясь их продолжением. Подразделение на межгорные и предгорные бассейны условно и эти группы месторождений подземных вод часто изучаются и используются одновременно. Сложены они гравийно-галечниковыми отложениями, разделенными не выдержанными в плане и разрезе суглинистыми отложениями, содержащими гравий и гальку и являющимися относительным водоупором. Поэтому все водоносные прослои, как правило, представляют собой единый водоносный комплекс. В отдельных случаях (например, Араратская долина) гравийно-галечниковые отложения подстилаются высокопроницаемыми коренными (лавовыми) отложениями, содержащими мощные водоносные горизонты, гидравлически взаимосвязанные с вышележащим гравийно-галечниковым водоносным комплексом. Благодаря значительным превышениям областей питания над областями разгрузки большинство скважин в таких бассейнах в естественных условиях дают самоизлив. Величины напоров падают от гор к долине и растут с глубиной. Питание бассейнов происходит на предгорных шлейфах за счет потерь речного стока, боковых притоков, а также за счет подтока подземных вод коренных отложений и потерь из оросительных каналов. Разгрузка осуществляется за счет перетекания в грунтовые воды и реку в центре впадины или долины, а также за счет эксплуатации подземных вод на водоснабжение и орошение, что в настоящее время в ряде районов страны (например, в Азербайджане) представляет собой основной расходный элемент баланса подземных вод.

В связи с тем что эксплуатационные скважины чаще всего оборудуются фильтрами сразу на несколько водоносных горизонтов, наблюдательные скважины должны иметь одинаковую с ними конструкцию. Размещаются они по тем же принципам, что и для артезианских бассейнов платформенного типа в условиях перетекания, т. е. одна скважина в центре водозабора, вторая — на расстоянии R, третья — на расстоянии $1{,}5R$ при групповом расположении и $0{,}5l$ — при линейном. Лучи скважин закладываются вкрест и вдоль потока. При наличии возможных границ пласта (питающих или непроницаемых) створ минимум из двух наблюдательных скважин направляется в сторону такой границы. В связи с тем что основное питание идет за счет перетекания, главные створы скважин на эксплуатируемый горизонт дублируются единичными скважинами на горизонты, из которых идет перетекание.

Принимая во внимание часто большие размеры водозаборов, длина которых достигает нескольких километров, что соизмеримо с шириной долины, а также интенсивную рассредоточенную по площади эксплуатацию подземных вод одиночными скважинами, заложенными на различные горизонты, наблюдательную сеть на отдельных водозаборах надо сочетать с наблюдениями за режимом подземных вод по всей межгорной впадине или долине в целом. В этом случае региональные створы наблюдательных скважин должны быть расположены поперек долины кустами на каждый из основных водоносных горизонтов зоны активного водообмена (см. рис. 1, *е*), включая грунтовые воды.

Учитывая возможную взаимосвязь пресных водоносных горизонтов с нижележащими минерализованными водами, в тех случаях, когда это имеет значение, одиночные наблюдательные скважины закладываются дополнительно на эти горизонты.

ВОДОЗАБОРЫ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ

Водозаборы в речных долинах, именуемые часто береговыми или инфильтрационными, являются наиболее распространенными. Это обусловлено, с одной стороны, их приближенностью к потребителю, так как населенные пункты чаще всего исторически закладывались в долинах рек, а с другой стороны, что более важно, высокой водообильностью как аллювиальных, так и взаимосвязанных с ними коренных отложений. Высокая производительность и перспективность инфильтрационных водозаборов определяется рядом причин.

1. Высокими коллекторскими свойствами пород. Аллювиальные отложения или полностью (в горных районах), или в нижней части (базальный горизонт и русловые фации) слагаются гравийно-галечниковыми и песчаными фракциями с высокой ($> 0{,}1-0{,}2$) водоотдачей. Подстилающие аллювий коренные отложения обладают повышенной трещиноватостью и закарстованностью по сравнению с междуречными пространствами.

2. Приближенностью к водозабору дополнительных источников восполнения подземных вод — привлекаемых из реки ресурсов, что также создает благоприятные условия для искусственного пополнения запасов подземных вод.

3. Дренированием долинами всех или большей части водоносных горизонтов, развитых в регионе, что обеспечивает перехват значительной части формирующихся в районе пресных подземных вод.

4. Повышенным инфильтрационным питанием подземных вод аллювия за счет поглощения склонового стока с междуречий. Это особенно существенно в районах, где водораздельные пространства сложены слабопроницаемыми отложениями. В этом случае подземные воды аллювиальных отложений являются более пресными по сравнению с подземными водами междуречий, в пределах которых могут быть и солоноватые воды.

5. Неглубоким залеганием подземных вод, что делает недорогим поиски, разведку и эксплуатацию подземных вод. Кроме того, в естественных условиях при неглубоком залегании подземных вод значительная часть подземных вод расходуется на испарение. При снижении уровней подземных вод в процессе их эксплуатации происходит увеличение питания подземных вод за счет снятия испарения.

Эксплуатация подземных вод в речных долинах имеет ряд недостатков:

1) подверженность подземных вод разного рода загрязнениям как со стороны реки, так и с поверхности земли;

2) ухудшение в процессе эксплуатации фильтрационных свойств водоносного горизонта и степени гидравлической связи поверхностных и

подземных вод за счет кольматации пор в долинах рек с высоким твердым стоком (мутностью воды);

3) уменьшение речного стока, который нередко строго учтен в водохозяйственных балансах регионов с дефицитом водных ресурсов, а также нанесение ущерба растительности;

4) возможность ухудшения качества воды во времени за счет осушения болот, подтягивания соленых вод снизу или сбоку;

5) выведением из оборота иногда значительных площадей ценных сельскохозяйственных земель в связи с созданием зон санитарной охраны в районах водозаборов. Это особенно существенно в долинах с маломощными аллювиальными отложениями, когда в силу слабой разработанности техники и отсутствия должного опыта создания лучевых водозаборов и водосборных галерей в сочетании с искусственным восполнением запасов подземных вод водозаборы растягиваются вдоль реки на многие километры.

Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в речных долинах являются прежде всего привлекаемые речные воды и в меньшей степени естественные ресурсы подземных вод.

В отдельных случаях запасы подземных вод формируются за счет периодической сработки емкости водоносного горизонта. Однако в различных гидрогеологических и климатических условиях соотношение этих источников и пополнение запасов подземных вод в отдельные сезоны года могут существенно изменяться. По степени гидравлической связи поверхностных и подземных вод месторождения подземных вод в речных долинах могут быть подразделены на четыре типа.

1. С совершенной или несколько затрудненной, но постоянной гидравлической связью. Это возможно в том случае, когда расход реки постоянно больше производительности водозабора и в течение всего года сохраняется подпертый режим фильтрации, т. е. уровни грунтовых вод не отрываются от уровня реки, и поэтому поверхностные воды являются основным источником формирования эксплуатационных запасов подземных вод.

2. С затрудненной и периодически нарушающейся гидравлической связью. В этом случае подпертый режим фильтрации может существовать лишь при определенных условиях в зависимости от соотношения размеров водоотбора и пропускной способности ложа реки. Расход реки может быть постоянно выше производительности водозабора, но совершенная гидравлическая связь поверхностных и подземных вод имеет место лишь во время паводков, когда заливается пойма. В межень вследствие затрудненности степени гидравлической связи наблюдается отрыв уровней подземных вод от поверхностных, но сохраняется постоянное подпитывание подземных вод поверхностными в форме дождевания. В эти периоды эксплуатационные запасы подземных вод складываются также из сработки естественных запасов подземных вод (емкости горизонта), перехвата подземного стока и дождевания из реки. Такие условия чаще всего наблюдаются в долинах, где основной эксплуатационный водоносный горизонт,

приуроченный к коренным отложениям, отделен от реки другим менее проницаемым горизонтом (аллювиальным).

3. С совершенной, но кратковременной гидравлической связью. В этом случае в силу пересыхания или перемерзания реки питание подземных вод поверхностными осуществляется лишь во время паводка, иногда всего в течение двух-трех месяцев, т. е. до момента пересыхания или только в течение теплого периода года (при перемерзании реки). Эксплуатационные запасы подземных вод в это время формируются за счет поглощения паводкового стока, периодической сработки естественных запасов и частично перехвата подземного стока.

4. Гидравлическая связь поверхностных и подземных вод практически отсутствует. Такие месторождения в речных долинах приурочены к аллювию переуглубленных долин, изолированных от современного аллювия слабопроницаемыми отложениями. В естественнных условиях влияние реки на подземные воды таких долин проявляется главным образом за счет передачи давления паводковых вод, что позволяет отнести такой режим к приречному типу. Однако в условиях эксплуатации взаимосвязь поверхностных и подземных вод весьма затруднена и осуществляется в основном за счет изменения перетекания, а также по гидрогеологическим (гидравлическим) окнам и зоне трещиноватости в бортах долин.

Специфические задачи изучения режима подземных вод в районах водозаборов в речных долинах с учетом вышеотмеченных особенностей формирования запасов подземных вод следующие:

1. Установление степени гидравлической связи эксплуатируемого водоносного горизонта с рекой, особеннсоти изменения этой связи в разные сезоны года, а также оценка возможности нарушения такой связи в процессе эксплуатации.

2. Изучение режима восполнения запасов подземных вод в зависимости от режима поверхностных вод. Установление гарантированных за многолетие продолжительностей периодов питания и соответственно периодов сработки запасов подземных вод при отсутствии или резком сокращении восполнения из реки в отдельные маловодные периоды.

3. Оценка естественного питания подземных вод, как минимально гарантированной величины восполнения запасов подземных вод при отсутствии восполнения из реки.

4. Изучение закономерностей чередования мало- и многоводных серий, как основы для оптимизации водоотбора подземных вод.

5. Оценка измерений речного стока, т. е. определение влияния водоотбора на размеры поверхностного стока и характер его внутригодового распределения.

6. Установление и уточнение расчетных параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод, корректура изменения расчетных параметров в процессе эксплуатации.

7. Составление и уточнение в процессе работы водозабора прогнозов изменений качества подземных вод.

8. Оценка эффективности искусственного пополнения запасов подземных вод в целях управления этим процессом.

9. Изучение особенностей гидрологического режима на участке водозабора, способных изменить степень гидравлической связи поверхностных и подземных вод — смещение уреза реки по сезонам года и за многолетие, подрезание берегов или формирование пляжей, изменение профиля дна реки, образование различных ледовых явлений (зажоры, заторы, перемерзание береговой линии), изменение качества речных вод, изменение восполнения при зарегулировании поверхностного стока и при эксплуатации.

Эксплуатационные скважины на водозаборах инфильтрационного типа ввиду линейного характера источника восполнения закладываются также в виде линейных рядов, состоящих чаще всего из одного, реже двух (с обеих сторон реки) и очень редко — из трех рядов.

Наблюдательная сеть на таких водозаборах размещается в соответствии с перечисленными выше задачами и расчетными схемами, принятыми для оценки запасов подземных вод. В соответствии с четырьмя типами взаимосвязи поверхностных и подземных вод наиболее употребительны четыре основные схемы размещения наблюдательной сети.

Первая расчетная схема — водозабор расположен на участке с заведомо четкой связью поверхностных и подземных вод, где отрыв уровней невозможен.

В таких условиях воронка депрессии очень быстро стабилизируется и расход водозабора в значительной степени обеспечивается подтоком поверхностных вод из реки. Режим подземных вод в районе таких водозаборов целиком определяется режимами поверхностных вод и эксплуатации. Организация стационарных наблюдений целесообразна лишь тогда, когда ставится задача переоценки запасов подземных вод или имеется угроза того, что подток загрязненных вод может резко ухудшить качество эксплуатируемых подземных вод.

Для оценки скорости подтока загрязненных вод, изучения процесса их очистки и своевременного предупреждения о продвижении фронта таких вод к водозабору необходимо заложить два взаимно перпендикулярных створа скважин (рис. 2, *а*), также минимум с тремя скважинами в каждом из них. Первая скважина закладывается в центре линейного ряда водозабора, вторая — на расстоянии *l* от центра водозабора по направлению к реке (с расстояниями между скважинами 1/2 *l*) третья — вблизи уреза реки, где *l* — расстояние водозабора до реки. Скважины, закладываемые на линии водозаборного ряда, приурочиваются как к высокодебитным, так и к низкодебитным.

При наличии резкой фильтрационной неоднородности вдоль ряда соответственно закладываются как минимум два перпендикулярных к реке створа (от высоко- и низкодебитных скважин). Это позволит оценить экстремальные условия изменчивости возможных понижений уровня и качества воды во времени. При сравнительно однородных условиях можно ограничиться одним створом от наиболее высокодебитной скважины. При ограниченной ширине аллювия этот створ следует продлить на одну-две скважины в сторону коренного склона на расстояниях *l* и 2*l*.

Скважины второго створа закладываются следующим образом (см. рис. 2, *а*) : первая (скв. 4 на схеме) располагается около последней экс-

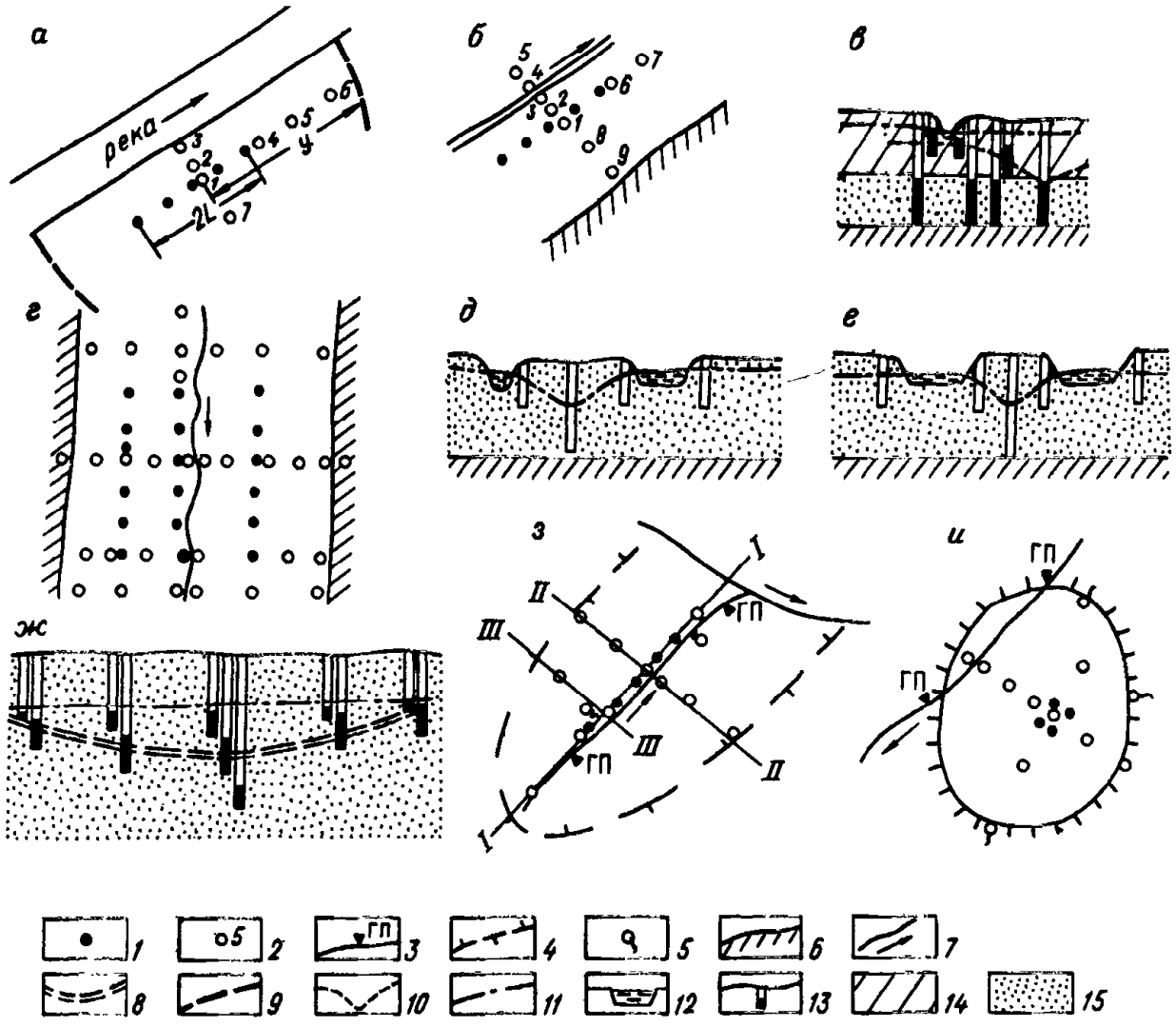


Рис. 2. Схемы размещения наблюдательной сети в районах водозаборов в условиях: *а* — подпертого режима фильтрации из реки; *б — е* — возможного отрыва уровней подземных вод от раки; *г* — непостоянного поверхностного стока; *д — е* — искусственного восполнения из одного или двух инфильтрационных бассейнов; *ж* — линз пресных вод; *з* — закарстованных территорий; *и* — замкнутых структур. *1* — эксплуатационные скважины; *2* — наблюдательные скважины; *3* — гидрометрический пост; *4* — линия водораздела; *5* — источник; *6* — контур слабопроницеемых отложений; *7* — направление течения реки; *8* — граница раздела пресных и соленых вод; *9* — граница влияния водозабора; *10* — пьезометрическая поверхность; *11* — уровень грунтовых вод; *12* — инфильтрационный бассейн; *13* — скважина с фильтром; *14* — слабопроницаемые породы; *15* — водонасыщенные породы.

Римскими цифреми даны номера створов

плуатационной скважины; скважины 5 и 6 данного створа могут быть размещены на расстоянии $1/3(y - L)$ и $2/3(y - L)$, где L — половина длины водозабора. Зона влияния водозабора y оценивается по номограммам Е.Л. Минкина (рис. 3).

Единичный расход потока грунтовых вод q, необходимый для таких оценок, определяется по номограмме, по карте гидроизогипс (формуле Дюпюи) или по данным детальных гидрологических наблюдений за приростом расхода реки на участке водозабора.

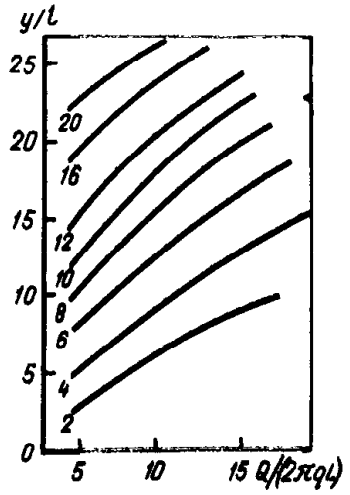


Рис. 3. Номограмма Е.Л. Минкина для определения зоны влияния водозабора при потоке, направленном к реке. Цифры при кривых — значения z//

Специфические особенности в размещении наблюдательной сети на водозаборах первого типа (в долинах рек) вносят сложность гидрохимической обстановки, что характерно для водозаборов на реках среднеазиатского типа. В зоне влияния водозабора, заложенного у реки, питающей грунтовые воды, и с глубиной и по вертикали наблюдается постепенное увеличение минерализации подземных вод. Для оценки скорости и размеров возможного подтока снизу сильно минерализованных вод к водозабору в центральной части воронки депрессии проектируются два-три куста наблюдательных скважин с ярусно расположенными фильтрами по две скважины в каждом кусте, а в центре воронки — три скважины в кусте.

Для оценки скорости и размеров возможного подтока сильноминерализованных вод к водозабору по потоку наблюдательная сеть закладывается вблизи контура соленых вод. Для береговых водозаборов в долинах рек среднеазиатского типа помимо потока минерализованных вод важна также оценка степени кольматации водоносного горизонта, так как во время паводков мутность рек резко возрастает.

Вторая расчетная схема — водозабор расположен в долинах рек второго типа, где тесная гидравлическая связь омечается лишь во время паводков, когда происходит полное восстановление запасов подземных вод, сработанных в период межени. Режим уровней подземных вод соответственно имеет четкий сезонный характер с резкими подъемами в паводок и снижениями нередко до предельно допустимых понижений к предпаводочному периоду. Наблюдения за режимом в таких случаях чрезвычайно важны, так как они позволяют и прогнозировать возможную критическую сработку запасов подземных вод и управлять режимом водоотбора или искусственным восполнением, чтобы недопустить перепонижения уровней.

Наблюдательные скважины размещаются здесь аналогично водозаборам в долинах первого типа, но с обязательным продолжением основного поперечного створа за реку. Это делается в тех случаях, когда по предварительным оценкам можно ожидать отрыва уровней подземных вод от реки. За рекой необходимо заложить минимум одну, но лучше две наблю-

дательные скважины, которые позволят и уточнить наличие отрыва и рассчитать величину дождевания.

В нешироких долинах, когда воронка депрессии в меженный период достигает бортов долины, наблюдательные скважины размещаются вкрест всей долины (см. рис. 2, *б*) минимум по две скважины на каждом луче от центра до бортов долины. Если долина вложена в менее проницаемые, но обводненные отложения, дополнительно закладывается по одной скважине в коренные породы. Продольный (вдоль долины) ряд также целесообразно продлить в обе стороны от водозабора минимум по две скважины на расстояниях 0,5/ и / от крайних скважин ряда.

Если основной водоносный горизонт приурочен к трещиноватым отложениям с трещиноватостью, развитой вдоль долин (например, как на водозаборах Северодонецкого типа), наблюдательные скважины закладываются поперек всей зоны повышенной трещиноватости, а также дублируются на вышележащий аллювиальный горизонт, гидравлически связанный с эксплуатируемым. На водозаборах большой протяженности поперечных створов делается несколько. Во всех случаях крайние скважины на продольных створах наблюдательных скважин закладываются за пределами воронки депрессии — в естественных условиях.

Третья расчетная схема — водозабор расположен в долинах третьего типа с периодически пересыхающими или перемерзающими водотоками, где восполнение запасов подземных вод кратковременно и поэтому полное восстановление уровней возможно не каждый год. В ряде районов такие многоводные годы, способные полностью восполнить сработанные запасы подземных вод, повторяются через каждые 2, 6, 9 лет. В результате режим работы водозабора имеет как четко выраженный сезонный, так и многолетний характер. Как правило, данный тип месторождений подземных вод приурочен к небольшим рекам с маломощным аллювием. В целях более полной сработки емкости такого водоносного горизонта в период отсутствия питания из реки эксплуатационные скважины закладываются в виде двух-трех линейных рядов значительной протяженности. Напряженность режима восполнения диктует здесь необходимость учитывать детально роль всех составляющих формирования эксплуатационных запасов подземных вод: закономерностей сезонного и многолетнего поглощения поверхностного стока, естественного инфильтрационного питания подземных вод атмосферными осадками, перехват подземного стока со стороны водоразделов, снятие испарения, возможную периодическую сработку естественных запасов подземных вод горизонта, т. е. его емкости. Наблюдательная сеть в таких условиях должна быть достаточно плотной, особенно если принять во внимание фильтрационную неоднородность и изменчивость мощностей горизонта в плане, а также площадной характер эксплуатации. В задачу наблюдений здесь входит не только изучение режима восполнения, но и определение оптимального режима эксплуатации. Наблюдательная сеть закладывается в виде серии поперечных через долины створов с размещением наблюдательчых скважин в центре каждого из створов эксплуатационных скважин, между ними, а также между крайними рядами и бортом долины. Если борта долины сложены проницае-

мыми отложениями, то в них также закладываются по одной скважине вблизи границы с аллювиальными отложениями. Вверх и вниз по долине от водозабора в пределах воронки депрессии целесообразно заложить также по два поперечных створа с тремя скважинами в каждом — у реки и в центре между рекой и бортами долины (см. рис. 2, *г*). Во всех случаях, когда врез долины существенно несовершенен и в силу этого возможны искажения потока вблизи реки, целесообразно заложение этажных пьезометров в зоне возможных искажений, особенно в условиях часто встречаемой резкой по вертикали фильтрационной неоднородности строения аллювия (см. рис. 2, *в*). При наличии искусственных водоемов (инфильтрационных бассейнов) для восполнения запасов подземных вод наблюдательная сеть закладывается створами в направлении от водозабора к бассейнам с минимум тремя скважинами в створе. Одна из них вблизи бассейна, вторая — между бассейном и водозабором. Третья скважина закладывается за бассейном (см. рис. 2, *д, е*) и служит для изучения возможного отрыва уровней от дна бассейна при их затоплении.

Четвертая расчетная схема — водозабор расположен в долинах четвертого типа, т. е. в переуглубленных долинах, где привлечение поверхностных вод к водозабору либо не существенно, либо вообще отсутствует. Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод здесь являются естественные запасы (упругие на первом этапе и гравитационные на втором), а также естественные ресурсы, главным образом перехват подземного стока из прорезаемых коренных отложений. При перекрытии эксплуатируемого горизонта сверху относительно проницаемыми отложениями с гидрогеологическими окнами возможно перетекание подземных вод из вышележащих современных отложений. В этом случае режим уровней подземных вод имеет более четкий сезонный характер, чем при отсутствии перетекания, и здесь может быть заметен вклад поверхностных вод в структуру эксплуатационных запасов подземных вод. На месторождениях этого типа важно оценить возможное влияние разгружающихся в долинах минерализованных вод на качество подземных вод основного водоносного горизонта. Как известно, под долинами рек нередко встречается куполообразное залегание подземных вод, которое особенно четко прослеживается вблизи переуглубленных долин. Эксплуатация подземных вод может интенсифицировать эту разгрузку.

Наблюдательная сеть в долинах четвертого типа также закладывается створами поперек и вдоль долины от центра ряда эксплуатационных скважин как в пределах самой долины, так и в обрамляющих ее бортах и коренных отложениях, откуда возможен подток некондиционных по качеству подземных вод. При наличии гидрогеологических окон одна-две наблюдательные скважины закладываются в их направлении.

Эксплуатация подземных вод переуглубленных долин обычно сопровождается эксплуатацией и вышезалегающих современных аллювиальных отложений, где создается своя наблюдательная сеть. Однако если в силу каких-либо причин (например, из-за загрязненности) такая эксплуатация не ведется, то при возможном перетекании подземных вод сверху наблю-

дательная сеть закладывается и в верхнем горизонте в виде поперечного и продольного профилей там, где взаимосвязь горизонтов наиболее вероятна.

ВОДОЗАБОРЫ В РАЙОНАХ ЗАНДРОВЫХ И ФЛЮВИОГЛЯЦИАЛЬНЫХ РАВНИН

Месторождения подземных вод этого типа приурочены обычно либо к грунтовым водам в флювиогляциальных и зандровых равнинах, сложенных песками иногда с гравием, либо к флювиогляциальным пескам различных ледниковых эпох, разделенных между собой относительно слабопроницаемыми моренными образованиями. Водовмещающие прослои в таких толщах не выдержаны в плане и разрезе, нередко взаимодействуют между собой по гидрогеологическим окнам и через морену ограниченной мощности. Поэтому такие толщи часто рассматриваются как единый водоносный комплекс и эксплуатационные скважины оборудуются фильтрами сразу на несколько водоносных прослоев.

Особенностью месторождений, расположенных на зандровых и флювиогляциальных равнинах, является ограниченность питания грунтовых вод и значительные размеры естественных запасов подземных вод. Восполнение горизонта осуществляется главным образом за счет атмосферных осадков, выпадающих в пределах воронки депрессии. Помимо этого в процессе эксплуатации может появиться возможность увеличения запасов за счет уменьшения испарения с поверхности грунтовых вод и поглощения поверхностных вод болот, ручьев и источников. Водозаборы, заложенные на флювиогляциальные прослои между мореной, работают так же, как в напорных пластах с перетеканием. В процессе эксплуатации возможно привлечение грунтовых вод и отжатие воды из глин при снятии с них гидростатического давления.

Однако размеры привлекаемых запасов нередко невелики и поэтому они не могут как-то существенно сказаться на режиме работы водозабора. Водозаборы в таких условиях чаще работают либо в неустановившемся режиме фильтрации с постоянным во времени снижением уровней подземных вод с небольшими сезонными колебаниями уровней за счет некоторого увеличения восполнения запасов в паводок, либо в условиях стационарного режима фильтрации.

Другой особенностью подземных вод зандровых и флювиогляциальных равнин являются значительные колебания их уровня в многолетнем разрезе, которые иногда для грунтовых вод достигают 4–6 м и более. Если не учитывать положение уровня подземных вод за изученные годы по отношению к многолетнему циклу колебаний их уровней (находятся ли эти годы в максимуме или минимуме многолетнего положения уровня), то это может в отдельных случаях привести к существенным ошибкам как при выборе исходных расчетных параметров (например, средней мощности водоносного горизонта и допустимых понижений), так и при оценке размеров восполнения водоносного горизонта за период эксплуатации.

Эксплуатация подземных вод в приводораздельных участках приводит нередко к существенному изменению гидрогеологических условий бассейна. В процессе развития воронки депрессии смещаются подземные водоразделы, в результате чего могут измениться площади водосбора бассейна, модули подземного стока и т. д. Снижение уровня грунтовых вод под влиянием их эксплуатации может вызвать изменение естественного баланса грунтовых вод. Как известно, при увеличении мощности зоны аэрации размеры инфильтрации осадков до грунтовых вод постепенно уменьшаются. В большинстве случаев уменьшается и результирующая этих элементов баланса — величина размеров питания грунтовых вод.

Таким образом, формирование эксплуатационных запасов подземных вод осуществляется за счет сработки естественных запасов (упругих и гравитационных), перетекания, инфильтрационного питания подземных вод и привлекаемых из поверхностных вод ресурсов.

Специфические для данного типа месторождений подземных вод задачи изучения режима подземных вод могут быть сформулированы следующим образом. Для грунтовых вод: 1) оценка размеров питания водоносного горизонта в естественных условиях за счет инфильтрации атмосферных осадков; 2) установпение зависимости изменения размеров питания с глубиной в целях прогнозирования изменения питания во времени; 3) оценка размеров подтока напорных вод к водозабору и изменение во времени их роли в питании эксплуатируемого водоносного горизонта; 4) оценка возможного увеличения восполнения запасов подземных вод междуречья за счет смещения подземного водораздела и перехвата ручьев; 5) выявление многолетних закономерностей (цикличности, многолетних трендов) естественного восполнения запасов подземных вод.

Для напорных вод: 1) уточнение расчетных параметров по опыту эксплуатации, так как в силу спожности гидрогеологических условий установить их достоверно в процессе разведочных работ трудно; 2) уточнение величин перетекания из смежных с эксплуатируемым водоносных горизонтов; 3) определение влияния эксплуатации на грунтовые воды, поверхностные водотоки, а также на экологическую обстановку в районе (на болота и т. д.).

Размещение наблюдательной сети производится в соответствии с комплексом тех задач, которые ставятся для конкретного участка водозабора.

Основной расчетной схемой для междуречий зандровых равнин является схема "неограниченного пласта". Выбор расстояний заложений наблюдательных скважин от водозабора производится по соответствующим формулам для условий безнапорного пласта, задаваясь понижениями, равными $1/3S_{доп}$ и $2/3S_{доп}$ для первой и второй наблюдательных скважин в пределах воронки депрессии. Одна-две скважины закладываются в пределах большого колодца — в его центре и на расстоянии R.

Аналогично схеме размещения наблюдательных скважин в "неограниченном пласте" для напорных вод (см. рис. 1, *а*), в данном случае, задаваясь значениями $S_2 = 2/3S_{доп}$, $S_3 = 1/3S_{доп}$ и $S_4 = 0{,}5\Delta h$, (где Δh — амплитуда сезонных колебаний уровней), а также сроком амортизации и проектным дебитом водозабора, можно рассчитать расстояния заложения

второй, третьей и четвертой наблюдательных скважин каждого из проектируемых лучей скважин. Первая скважина закладывается в центре водозабора. Число лучей наблюдательных скважин может быть определено с учетом сложности гидрогеологических условий.

Направление заложения лучей выбирается в зависимости от размещения источников возможного восполнения водоносного горизонта, т. е. от направления потока подземных вод со стороны водоразделов, в сторону ручьев, привлечение вод которых возможно.

Для оценки возможного подтока напорных вод снизу в центральной части воронки депрессии, где разность напоров будет максимальной, проектируется один или два куста наблюдательных скважин (по две-три скважины в каждом из них) с ярусно расположенными фильтрами.

ВОДОЗАБОРЫ В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ПЕСЧАНЫХ МАССИВОВ ПУСТЫНЬ И ПОЛУПУСТЫНЬ

Эти месторождения приурочены обычно к линзам и зонам развития пресных вод, развитых среди солоноватых и соленых вод.

Линзы пресных вод, плавающих на соленых водах, — явление довольно распространенное для аридных зон. При этом в ряде районов нашей страны (на Черных Землях, в Прикаспии, в пустынях Каракум, Кызылкум и других районах) линзы пресных подземных вод являются одним из основных источников водоснабжения. По условиям образования они подразделяются на несколько типов: подрусловые (приуроченные к древним и пересыхающим водотокам), подтакырные, лиманные, подпесчаные линзы пустынь и полупустынь, а также линзы низкогорных и предгорных равнин.

Эксплуатационные запасы подземных вод таких месторождений формируются за счет сработки емкости, естественного инфильтрационного и реже конденсационного питания, а также в ряде случаев за счет поглощения поверхностного и склонового стока. Естественное восполнение линз во многих случаях незначительное, и поэтому при эксплуатации таких линз наблюдается постепенное снижение уровней подземных вод.

Размеры линз при мощности до 25 м и более различны: от десятков квадратных метров до десятков — сотен квадратных километров. Одной из основных особенностей линз пресных вод, несмотря на значительные размеры отдельных из них, является ограниченность их запасов и восполнения, которое в ряде случаев вообще отсутствует. Поэтому точная оценка эксплуатационных запасов линз пресных вод без излишних "запасов прочности" очень важна.

Другой особенностью линз пресных вод является неизбежность подтока соленых вод к водозабору. При этом соленые воды стягиваются к водозабору по горизонтали и главным образом снизу. Проведенные В.М. Гольдбергом и И.С. Глазуновым экспериментальные и теоретические исследования показали, что подсос соленых вод снизу в виде языков происходит очень быстро и качество вод в эксплуатационных скважинах также быстро ухудшается. Избежать этого явления можно лишь при одновременных совместных откачках соленых и пресных вод, в результате кото-

рых контур границы соленые — пресные воды может быть удержан в равновесии. Условием сохранения такого равновесия является правильный подбор соотношений расходов Q одновременно откачиваемых соленых и пресных вод, которые могут быть определены при однородном строении горизонта в зависимости от соотношения мощностей пресных и соленых вод $Q_{пр}/Q_{сол} \leqslant m_{пр}/m_{сол}$, а при неоднородном строении горизонта $Q_{пр}/Q_{сол} \approx (km_{пр})/(km_{сол})$. Ввиду того, что мощность пресных вод в процессе эксплуатации постоянно будет уменьшаться, следует постоянно вносить корректуры в соотношение расходов $Q_{пр}/Q_{сол}$.

Для того чтобы получить максимальный объем пресной воды из линзы, не испортив ее качества, необходима хорошо продуманная система размещения эксплуатационных скважин и правильный, основанный на постоянных наблюдениях за изменениями положений контура соленых вод режим их эксплуатации, который сможет обеспечить равномерность стягивания контура соленых вод.

Задачи изучения режима подземных вод в районах водозаборов, заложенных на линзах пресных вод с учетом указанных особенностей, следующие: 1) определение размеров питания линзы; 2) оценка и прогноз изменения химического состава подземных вод в процессе их эксплуатации; 3) оценка скорости стягивания контура соленых вод с боков линзы; 4) определение и корректирование рационального режима эксплуатации (изменение соотношения $Q_{пр}/Q_{сол}$ во времени) с целью поддержания равновесия границы раздела соленых и пресных вод снизу; 5) установление влияния эксплуатируемой линзы на соседние линзы.

В соответствии с этими задачами наблюдательную сеть целесообразно проектировать в виде двух взаимно пересекающихся створов как вдоль длинной, так и вдоль короткой оси линзы от эксплуатационных скважин и до границ линзы по два-три куста скважин в каждом луче (см. рис. 2, *ж*). Для оценки перемещения контура соленых вод по вертикали бурят несколько скважин с установкой фильтров на разных уровнях (в основании линзы, в средней ее части и в подошве). В районах, где подсос минерализованных вод наиболее вероятен, количество наблюдательных скважин с фильтрами на разных уровнях должно быть увеличено. Вблизи границ линзы скважины оборудуются фильтрами длиной до 10 м, чтобы изучить изменения контакта раздела пресных и соленых вод во времени. За его динамикой можно наблюдать геофизическими методами (например, с помощью резистивиметрии). Особенно детальными частыми должны быть наблюдения в районе эксплуатационных скважин, включая наблюдения за водоотбором пресных и соленых вод, уровнями подземных вод, положением линии раздела пресных и соленых подземных вод.

ВОДОЗАБОРЫ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ ВОД ОГРАНИЧЕННЫХ СТРУКТУР И ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОДОСБОРНЫХ БАССЕЙНОВ

Карстовые и трещинно-карстовые отложения как гидрогеологическая среда обладают целым рядом специфических особенностей, определяющих в свою очередь специфику гидрогеологических исследований в целом

и изучение режима подземных вод в частности. Среди наиболее важных особенностей можно выделить следующие:

1. Наличие нередко блоковой структуры водоносных горизонтов, изолированных друг от друга непроницаемыми или полупроницаемыми барьерами в пределах генетически однотипных отложений одного возраста, выдержанных даже на больших площадях.

2. Резкая фильтрационная неоднородность водовмещений среды как в плане, так и в разрезе, обусловленная литолого-фациальными, тектоническими, геоморфологическими и палеогидрогеологическими условиями региона. Коэффициенты фильтрации пород на коротких расстояниях могут изменяться в десятки раз, а водоотдача — в несколько раз.

3. Наиболее высокая зависимость режима, баланса и ресурсов подземных вод от гидрогеологической обстановки, а отсюда высокая динамичность режима, активность водообмена и неравномерность питания подземных вод во времени.

4. Сложная пространственная структура фильтрационных потоков, подчиняющихся в различных своих частях ламинарному или турбулентному закону фильтрации и характеризующихся неупорядоченностью форм (извилистостью, многоярусностью, перепадами высот — подземными водопадами, сифонной циркуляцией, чередованием напорных и безнапорных участков фильтрации, наличием подземных регулирующих резервуаров — подземных озер и т. д.).

5. Сложная структура емкости водовмещающей среды, аппроксимируемая двойной или тройной пористостью. Так, на графиках временного прослеживания при обработке данных опытных откачек и особенно по кривым истощения можно зафиксировать от двух до семи перегибов, отвечающих осушению различных по емкостным параметрам зон — крупных каналов и пещер, крупных трещин, каверн и зон разломов, мелких и средних трещин, микротрещин и пор.

6. Непостоянство основных расчетных гидрогеологических параметров во времени и их изменчивость под влиянием различной хозяйственной деятельности. Затухание трещиноватости и закарстованности с глубиной.

7. Повышенная связь карстовых вод с окружающей средой, что определяет, с одной стороны, активное влияние изменений в среде на подземные воды, например на их загрязнение, а с другой — воздействие изменяющихся гидрогеологических условий на среду, т. е. активизацию карстово-суффозионных процессов, провалов земной поверхности и т. д. Таким образом, для карстовых районов особенно тесна связь гидрогеологических и инженерно-геологических процессов.

Можно отметить и повышенную хозяйственную значимость карстовых вод. Тесная связь с источниками восполнения определяет высокую водообильность карстовых водоносных горизонтов. В связи с этим они служат перспективным источником водоснабжения. Эксплуатационные запасы подземных вод таких месторождений формируются прежде всего за счет естественных ресурсов, т. е. питания подземных вод, а также на участках взаимосвязи поверхностных и подземных вод в значительной

мере за счет привлекаемых поверхностных вод. В отдельных случаях, например в замкнутых структурах, существенным может оказаться и сработка естественнных запасов подземных вод. Регулирующая "емкость" горизонта оказывается значительной и в случаях, когда эксплуатируемый трещинно-карстовый горизонт перекрыт рыхлыми также обводненными отложениями. Все эти источники восполнения оценить при разведке трудно, а поэтому особая роль здесь отводится наблюдениям за режимом подземных вод.

Основные задачи изучения режима трещинных и карстовых вод в районах водозаборов могут быть сформулированы следующим образом:

1. Оценка размеров питания трещинно-карстовых вод в естественных условиях заданной или оптимальной обеспеченности.

2. Наблюдения за режимом подземных вод в процессе работы водозабора для уточнения расчетных параметров или эмпирических зависимостей дебитов от понижения для оценки запасов подземных вод и оптимизации режима их эксплуатации.

3. Установление наличия и степени гидравлической связи подземных вод с поверхностными водотоками и водоемами.

4. Установление эмпирическим путем возможности увеличения водоотбора выше минимального питания за счет сработки емкости горизонта в маловодный период при гарантированном восполнении сработанных запасов в последующий многоводный период.

5. Оценка изменения качества подземных вод во времени.

Изучение естественных ресурсов трещинно-карстовых вод в наибольшей мере требует комплексных оценок и поэтому производится на основе: а) наблюдений за режимом подземных вод по скважинам; б) наблюдений за режимом подземных вод по источникам; в) гидрологических наблюдений; г) проведения снегомерных съемок и воднобалансовых исследований.

Амплитуды колебаний уровня трещинно-карстовых вод достигают нередко 10—25 м и более. Чаще всего это кратковременные и резкие подъемы и спады, но встречаются также и рассредоточенные во времени колебания уровней. Для изучения особенно динамичных колебаний уровней наблюдательные скважины оборудуются самописцами. Определить точно размеры питания водоносного горизонта только по величине амплитуд колебаний уровня подземных вод трудно, так как для трещиноватых и закарстованных пород установить точно величину водоотдачи для зоны колебаний уровней подземных вод и по площади невозможно. Распространить эти данные применительно ко всей площади не всегда возможно. Поэтому такие расчеты могут рассматриваться лишь как приближенные и должны корректироваться различными независимыми способами. При организации водоснабжения путем каптажа источников определяется величина питания водоносного горизонта, которая, как правило, и берется за основу эксплуатационных запасов подземных вод.

По суммарному дебиту родников можно оценить размеры питания замкнутых структур и изучить закономерности его изменчивости как в сезонном, так и в многолетнем разрезе, что при наличии регулирующей

емкости позволит определить оптимальную расчетную обеспеченность восполнения, т. е. гарантированный восполнением водоотбор (о чем будет сказано ниже). Режим дебитов источников нередко хорошо коррелируется с атмосферными осадками. На основании этой корреляции короткие ряды наблюдений за режимом дебитов или уровней подземных вод могут быть удлинены и по ним выбраны необходимые данные о питании горизонта. Данные режима дебитов источников чаще всего дают характеристику минимальных значений питания водоносного горизонта, так как часть расхода подземных вод помимо источников дренируется непосредственно в речную сеть, испаряется, некоторая часть подземных вод не разгружается в реки, а фильтруется подрусловым стоком. Эти составляющие разгрузки подземных вод могут быть оценены по материалам гидрологических наблюдений и анализам общего водного баланса изучаемого района.

Величина подземного стока, разгружающегося непосредственно в реку, определяется по гидрометрическим створам в периоды зимней и летней межени или по расчленению гидрографа рек. Гидрологические створы необходимо располагать как ниже, так и выше участка водозабора.

Наблюдение за режимом трещинно-карстовых вод в процессе работы водозабора особенно необходимо в тех случаях, когда гидродинамические методы для расчетов запасов этих вод по указанным выше причинам неприемлемы. В таких случаях для оценки запасов подземных вод трещиноватых и закарстованных массивов используется гидравлический метод, позволяющий эмпирически оценить (по опыту эксплуатации) оптимальный дебит водозабора при установившемся режиме фильтрации. При применении для оценки запасов трещинно-карстовых вод гидродинамических методов и методов моделирования необходимо иметь в виду возможность изменения фильтрационной способности пород в процессе эксплуатации. Увеличение проницаемости особенно вероятно при привлечении к водозабору агрессивных речных вод, что интенсифицирует карстово-суффозионные процессы. Наблюдательная сеть в таких случаях должна позволить уточнять путем решения обратных задач возможное изменение расчетных параметров, прогнозировать изменения и уточнять на этой основе эксплуатационные запасы подземных вод. При быстром снижении уровней подземных вод в процессе эксплуатации возможно и обратное явление — уменьшение проницаемости отложений за счет затухания трещиноватости и закарстованности пород с глубиной.

В связи с тем что большинство водозаборов в районах распространения трещинно-карстовых вод закладываются в долинах рек, важно установить степень гидравлической связи водоносного горизонта с рекой. Трещиноватость и закарстованность пород вблизи рек максимальны, а следовательно, фильтрационные свойства пород и условия восполнения запасов благоприятны. Однако аллювий малых рек нередко представлен менее проницаемыми породами. Разгрузка трещинно-карстовых вод происходит здесь через источники и перетеканием непосредственно в русло реки. Иногда непосредственная разгрузка подземных вод в реку может отсутствовать вообще или осуществляться лишь на отдельных участках. Установить наличие гидравлической связи в таких условиях важно, чтобы оценить возможность привлечения речных вод к водозабору.

Оценка изменений качества подземных вод во времени непосредственно связана с оценкой эксплуатационных запасов подземных вод. Как уже отмечалось выше, трещинные и карстовые воды часто имеют хорошую связь с дневной поверхностью. Нередки случаи непосредственной инфлюации поверхностных вод в водоносный горизонт. Возможность загрязнения подземных вод в таких условиях очевидна особенно при развитии воронки депрессии в зону урбанизированных площадей.

Загрязнение подземных вод может проявиться также при гидравлической связи подземных вод с рекой за счет подтока загрязненных речных вод. Самоочищения загрязненных вод в трещиноватых и закарстованных породах в отличие от рыхлых пористых пород практически не происходит, в связи с чем наблюдения за режимом химического и бактериологического составов имеют здесь особенно большое значение. Помимо этого, эксплуатация карстовых вод может привести и к увеличению их жесткости, активизации карстовых процессов, проявлению новых провалов земной поверхности. Жесткость карстовых вод даже в естественных условиях нередко бывает повышенной, близкой к предельно допустимым нормам.

В связи с указанными выше задачами в районах эксплуатации карстовых вод при размещении наблюдательной сети необходимо предусмотреть заложение наблюдательных скважин в районе развития воронки депрессии и за ее пределами — на прилегающих водоразделах, где осуществляется питание водоносного горизонта. Одновременно следует организовать наблюдения за родниками, выходящими из эксплуатируемого и связанного с ним водоносных горизонтов, а также за расходами поверхностных вод в районе водозабора. Составить типовую схему размещения наблюдательной сети довольно трудно, так как в различных гидрогеологических условиях задачи изучения режима решаться будут по-разному. Схематический план размещения наблюдательных точек в районе водозабора, расположенного в долине небольшой реки и эксплуатирующего трещинные или карстовые воды, приведен на рис. 2, *з*.

Ввиду того что воронка депрессии развивается неравномерно в зависимости от степени трещиноватости или закарстованности отложений, выбор направлений наблюдательных створов должен быть определен характером этой трещиноватости. Так, для схемы, представленной на рис. 2, *з*, основным направлением наибольшей трещиноватости пород является створ I—I, расположенный вдоль долины реки, где заложены эксплуатационные скважины и основная часть наблюдательных. Здесь же за пределами воронки депрессии организуются гидрологические створы для определения потерь речного стока в процессе эксплуатации и каптируются для наблюдений источники. Несколько меньшая, но также сравнительно высокая трещиноватость водовмещающих пород характерна для долин притоков, которые также являются основными участками формирования запасов подземных вод. Вдоль наиболее типичного притока, а если это необходимо, то и вдоль двух-трех притоков закладывается второй створ II—II. Междуречные пространства со слабой трещиноватостью могут быть также освещены наблюдательным створом III—III. Выбор направлений и числа наблюдательных створов должен быть увязан также, например,

с оценкой возможных загрязнений подземных вод со стороны известных очагов загрязнения, для расчета параметров по кривым истощения уровней и дебитов родников, для прогноза активизации карстовых процессов в направлении зоны застройки и т. д.

При многоярусном строении карстового массива наблюдательные скважины целесообразно закладывать на каждый из ярусов с тем, чтобы изучить особенности динамики карстовых вод и изменений режима их химического состава по вертикали.

Наблюдательная сеть в замкнутых структурах, сложенных трещинно-карстовыми отложениями, закладывается двумя пересекающимися в центре водозабора створами. Один из них размещается по потоку от области питания до области разгрузки, а другой поперек потока подземных вод. Если окружающие структуру породы проницаемы, то вблизи контакта со структурой в них закладывается по одной скважине на каждом профиле. Рсстояния между скважинами в створах можно определить расчетом для схемы "пласт-круг" или "пласт-полоса" по Ф.М. Бочеверу с расходами на границе $Q = \text{const}$ из условия, чтобы понижения в скважинах отличались более чем на 0,3—0,5 м. Если разгрузка подземных вод осуществляется родниками, то организуются наблюдения за их дебитами. Если же структура дренируется рекой, то создаются гидростворы для наблюдений за расходом реки до ее входа в структуру и на выходе ее из структуры (рис 2, *и*). При двухслойном строении водосодержащей толщи на каждый горизонт закладываются ярусные наблюдательные скважины.

ВОДОЗАБОРЫ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

В области развития многолетнемерзлых пород чаще всего выделяются месторождения подземных вод, приуроченные: к сквозным таликам, вдоль сравнительно крупных рек; к надмерзлотным талым зонам, расположенным под озерами или небольшими реками; к подмерзлотным водам. Сложность гидрогеологических условий таких месторождений определяется переменностью во времени их границ за счет сезонного сужения и расширения таликовых зон, перемерзанием рек и грунтовых вод, что приводит к изменению обобщенных расчетных параметров и граничных условий как в естественных условиях, так и в условиях эксплуатации. В таких районах бывает сложная гидрохимическая обстановка, так как в зимнее время в связи с отжатием солей из замерзающих вод и увеличением доли участия в формировании запасов подземных вод глубинного стока происходит ухудшение состава вод. Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в зонах сквозных таликов и надмерзлотных зонах являются естественные запасы, естественные ресурсы и подток поверхностных вод; в подмерзлотных водах — естественные запасы, главным образом упругие.

Принципы размещения наблюдательной сети в районах водозаборов этого типа месторождений должны учитывать и специфику изучения режима подземных вод, определяемую особенностями гидрогеологических условий, рассмотренную выше для различных типов месторождений,

и специфику районов многолетнемерзлых пород. Особенно важным элементом наблюдений становится здесь температура воды.

Наблюдательная сеть в сквозных таликовых зонах закладывается так же, как и в узких речных долинах с непроницаемыми границами. В подмерзлотных водах наблюдательная сеть размещается так же, как и в артезианских бассейнах платформенного типа с учетом или без учета перетекания. В надмерзлотных водах наблюдательная сеть закладывается несколькими створами поперек талых зон минимум по пять скважин в каждом створе — одна в центре водозабора и по две — между водозабором и границей многолетнемерзлых пород, причем крайние скважины располагаются вблизи нее. Наблюдательные скважины должны вскрыть всю толщу талой зоны и войти в мерзлую с тем, чтобы иметь возможность уточнять для прогнозных расчетов изменение границ обводненной толщи в процессе эксплуатации в сезонном и многолетнем разрезе.

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ НА СТАДИЯХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ

Большинство основных задач изучения режима подземных вод на стадиях предварительной и детальной разведки не отличаются от изложенных выше задач изучения режима подземных вод в районах действующих водозаборов. Данные наблюдения за режимом подземных вод также используются здесь для: 1) оценки всех возможных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод (естественных и привлекаемых ресурсов) и прогноза возможного изменения восполнения при эксплуатации подземных вод; 2) определения основных расчетных параметров и характера граничных условий, степени гидравлической связи с реками, взаимосвязи водоносных горизонтов, т. е. наличия перетекания, если это возможно установить опытными откачками, инверсии родников и т. д.; 3) выявления характера изменений во времени качества подземных вод.

Исследования питания и качества подземных вод в естественных условиях проводятся в региональном плане, а определения расчетных параметров и граничных условий — на участках опытно-фильтрационных работ. Размещение наблюдательной сети на этих участках проводится аналогичным образом как и для водозаборов с учетом типа месторождения. Однако при этом учитывается масштаб возможного влияния откачек, принимается во внимание и целесообразность сохранения этой наблюдательной сети для последующих наблюдений в процессе работы водозабора. Для изучения питания и качества подземных вод наблюдательная сеть на стадии изысканий должна быть размещена таким образом, чтобы при этом иметь возможность охарактеризовать все основные виды и разновидности режима подземных вод в пределах этого участка. Особенно важно знать особенности режима грунтовых вод, так как режим последних в зависимости от геологического и геоморфологического строения территории, а также от глубин залегания их уровня даже на сравнительно небольших расстояниях может меняться весьма существенно. В напорных водах, учитывая ограниченность размеров участка изысканий, таких существен-

ных изменений в характере режима подземных вод, как правило, не наблюдается. Поэтому в данном разделе рассматриваются принципы размещения наблюдательной сети лишь на грунтовые воды.

Основная задача при размещении такой сети — отразить все разнообразие режима грунтовых вод в пределах участка изысканий. Для этого необходимо провести гидрогеологическое районирование территории изысканий по условиям формирования режима грунтовых вод или по основным факторам, определяющим особенности режима и баланса подземных вод. К ним относятся: геологическое и геоморфологическое строение территории; глубины залегания грунтовых вод от поверхности земли (или мощность зоны аэрации); почвенный и растительный покров района и др.

На первом этапе районирования выявляются площади, отличающиеся литологическим составом водовмещающих пород и пород зоны аэрации (например, районы, сложенные песками, суглинками, известняками и галечниками). Затем в пределах каждого литологического района выделяются подрайоны, характеризующиеся разнообразным геоморфологическим строением территории, определяющим в пределах таких территорий различия видов режима грунтовых вод. В большинстве районов могут быть выделены четыре основных вида режима грунтовых вод: приречный, террасовый, склоновый и междуречный [21].

В пределах каждого из выделенных подрайонов в свою очередь выделяются участки с неодинаковой глубиной залегания грунтовых вод, определяющей различие в балансе грунтовых вод и характеризуемой разновидностями режима грунтовых вод. Например, в районах распространения междуречного и приречного вида режима при мощности зоны аэрации менее 0,5 м режим грунтовых вод характеризуется активной связью с дневной поверхностью, в расходной части их баланса испарение преобладает над оттоком; при мощности зоны аэрации от 0,5 до 4 м режим грунтовых вод характеризуется хотя и четкой, но менее активной связью с дневной поверхностью, в расходной части баланса подземных вод на большей части территории СССР (за исключением аридной зоны) отток преобладает над испарением; при мощности зоны аэрации свыше 4 м режим грунтовых вод характеризуется слабой связью или отсутствием связи грунтовых вод с дневной поверхностью, в расходной части баланса испарение имеет подчиненное значение.

В районах, где распространен приречный вид режима грунтовых вод, также могут быть выделены две разновидности режима: пойменный и подпорный. Не останавливаясь на детальной характеристике отмеченных видов режимов грунтовых вод, рассмотренных в ряде работ [21, 22 и др.], отметим лишь, что размещение наблюдательной сети на участке проектируемого водозабора должно призводиться лишь на основании указанного выше гидрогеологического районирования территории по условиям формирования режима грунтовых вод. Только в этом случае можно осветить все разнообразие режима грунтовых вод изучаемого участка и достаточно обоснованно оценить естественное восполнение запасов подземных вод, так как полученные по такой сети данные наблюдений за режи-

мом грунтовых вод могут экстраполироваться в пределах участков с одинаковым геологическим, геоморфологическим и гидрогеологическим строением.

В каждом из выявленных на основании такого районирования участков в основном достаточно заложить по одной скважине. В тех случаях, когда требуется детально выяснить элементы баланса грунтовых вод на отдельных наиболее характерных и важных участках, количество скважин следует увеличить с целью использования данных наблюдений для определения размеров инфильтрации и испарения от глубины залегания уровня как основы для прогноза возможного изменения естественного питания подземных вод при работе водозабора. Особенности размещения наблюдательных скважин при проведении опытных откачек применительно к различным гидрогеологическим и граничным условиям, а также условиям проведения опытных исследований рассмотрены в ряде работ [1, 4, 9 и др.].

РАЗМЕЩЕНИЕ ОПОРНОЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

В задачи региональной наблюдательной сети входит изучение изменений количества и качества подземных вод в региональном масштабе (в пределах крупных водохозяйственных и природных регионов) в целях прогноза этих изменений и планирования мер по их охране и рациональному использованию ресурсов подземных вод на республиканском или даже государственном уровнях

Эксплуатация подземных вод как крупными водозаборами, так и многочисленными одиночными эксплуатационными скважинами приводит в ряде районов к региональному снижению уровней подземных вод. Так, воронки депрессии в районе водоотлива из шахт и карьеров Курской магнитной аномалии (КМА), водозаборов Курска, Брянска и других городов Центральной черноземной области (ЦЧО) слились, активно взаимодействуют и поэтому прогноз снижения уровней подземных вод в этом районе возможен лишь на основе моделирования всего региона в целом. Региональное снижение уровней напорных вод в результате как рассредоточенной по площади, так и концентрированной эксплуатации наблюдается во всей равнинной части Крымского полуострова, в Московском и Ленинградском промышленных районах. Интенсивное использование подземных вод в Терско-Кумском и Араратском бассейнах привело к тому, что значительная часть самоизливающих скважин прекратили излив или снизили свои расходы. В районе Донбасса подземные воды сдренированы на площади в сотни тысяч квадратных километров. Снижение уровней подземных вод на крупных водозаборах страны составляет 2—3 м в год. Все большие масштабы принимает загрязнение подземных вод хозяйственного и питьевого назначения, делая эту воду непригодной полностью или частично. Влияние различной хозяйственной деятельности на качество подземных вод также приобрело региональный характер. Особенно массовым загрязнителем является сельское хозяйство, широкое применение в котором различных удобрений и ядохимикатов привело к загрязнению грунтовых вод нитратами, медью, пестицидами и другими элементами на

огромных площадях. Распространенными стали загрязнения подземных вод углеводородами (нефтепродуктами, фенолами), синтетическими поверхностно-активными веществами (СПАВ), бактериальное загрязнение. В районах животноводческих комплексов отмечаются загрязнения подземных вод нитратами, нитритами, аммонием. В районах крупных городов и химических предприятий, загрязняющих воздух и имеющих неизбежные утечки промстоков, подземные воды не только загрязнены отдельными специфическими микрокомпонентами, но и увеличивают свою минерализацию иногда на порядок. Здесь, как и в районах горнодобывающей промышленности, в количествах много выше предела допустимой концентрации (ПДК) можно встретить ртуть, цинк, медь, никель, хром, свинец, органику, бор, гексахлоран и т. д.

Изучение масштабов загрязнений подземных вод особенно важно именно в связи с возможностью использования подземных вод для питьевых целей. Поэтому региональная опорная наблюдательная сеть должна не только охарактеризовать изменение ресурсов подземных вод в региональном плане с учетом всей водохозяйственной деятельности, но и изучить изменения их качества.

Плотность региональной сети должна быть такой, чтобы она была в состоянии обеспечить построение региональных математических моделей, создаваемых для оценки состояния и прогноза изменений количества и качества подземных вод во времени в целях управления ими. В частности, такая сеть должна охарактеризовать: 1) естественный фоновый режим в регионе; 2) влияние на водный и солевой баланс всех основных водохозяйственных мероприятий в регионе (создание водохранилищ, водоотбор, водоотлив, орошение и осушение, урбанизация, химизация сельского хозяйства, мероприятия, связанные с переброской стока, и т. д.).

В зависимости от этого наблюдательная сеть должна дать сведения: 1) о зональных чертах режима подземных вод; 2) о региональных изменениях режима в пределах крупной водосборной площади — либо в пределах какого-то артезианского бассейна в целом, либо в пределах водосборного бассейна какой-то крупной реки; 3) о локальных изменениях режима подземных вод в районах отдельных водохозяйственных мероприятий.

Зональные черты режима подземных вод могут быть получены прежде всего по грунтовым водам. Наблюдательная сеть здесь планируется на основе гидрогеологического районирования территорий по условиям формирования режима подземных вод [21 и др.]. Наблюдательные скважины закладываются в виде створов от водоразделов к долинам в заведомо естественных условиях минимум по одной скважине в пределах каждого геоморфологического элемента, каждого гидрогеологического района, каждой гидрогеологической области и климатической зоны (если изучаемый бассейн охватывает несколько таких зон). В пределах однотипных в геологическом и геоморфологическом отношении районов наблюдательные скважины закладываются на участках с различной глубиной до воды в интервалах: до 1; от 1 до 4; более 4 м.

Гидрогеологические области выделяются по степени дренированности территорий, определяемой глубиной вреза речной сети и густотой расчле-

ненности рельефа. По этим показателям выделяются сильно расчлененные (глубина вреза более 200 м и расчлененность свыше 0,9 км/км^2), расчлененные (врез 50—200 м и расчлененность 0,3—0,9 км/км^2) и слабо расчлененные области (врез менее 50 м и расчлененность менее 0,3 км/км^2). При районировании территорий по геологическому строению возможне следующая группировка пород по литологическом составу: 1) пески, гравий, галечник; 2) супеси, суглинки, песчано-глинистые и лессовые отложения; 3) известняки, доломиты, мергели; 4) изверженно-вулканические образования (лавы, туфы); 5) кристаллические изверженные и метаморфизованные образования.

При двух- и трехслойном строении водоносных горизонтов наблюдательная сеть закладывается в виде кустов ярусно расположенных скважин на каждый из прослоев.

Для региональной характеристики режима подземных вод водосборного бассейна необходимо стремиться охарактеризовать отдельные его зоны с существенно различными фильтрационными свойствами, а также режим подземных вод в районе гидравлических границ бассейна. Обе условия отвечают требованиям построения модели бассейна. Для размещения наблюдательных точек в соответствии с разнообразием фильтрационных свойств моделируемого бассейна могут быть использованы существующие карты водопроводимости. Каждая зона с определенной градацией водопроводимости должна быть охарактеризована минимум одной наблюдательной точкой, а при обширных площадях с однотипной водопроводимостью — несколькими скважинами. Это необходимо для получения информации о региональных особенностях изменения уровней и качества подземных вод под влиянием хозяйственной деятельности человека, особенностях питания подземных вод и условиях взаимосвязи водоносных горизонтов по площади. Взаимосвязь водоносных горизонтов с проницаемыми и слабопроницаемыми гидравлическими границами оценивается короткими створами из двух-четырех скважин перпендикулярно к границам. У границ с реками, имеющими совершенный врез, достаточно иметь две скважины — одну вблизи уреза, а вторую на расстоянии 50—100 м. При несовершенном врезе реки следует заложить еще две скважины — за рекой на расстоянии 50 м и вблизи уреза. У границ с непроницаемыми отложениями достаточно иметь две скважины — одну вблизи границы, другую — на расстоянии 100 м от нее. При наличии полупроницаемой границы (с менее обводненными отложениями) следует разместить еще одну скважину на расстоянии 50—100 м от этой границы в менее проницаемых отложениях. Из-за неизбежной плановой неоднородности строения потока подземных вод на больших регионах наблюдательная сеть здесь получается направленно разбросанной по площади. Однако эта разбросанность должна быть упорядоченной, т. е. сгущения сети должны быть на участках сложных и переменных в плане и во времени потоков, в зонах наиболее чувствительных изменений в уровнях (например, вблизи водозабора, реки). Для получения детальной информации о балансе подземных вод на участках с радиальным или переменным во времени направлением потока наблюдательные скважины должны размещаться в виде прямоугольника, трапеции или креста.

В региональную опорную сеть должна быть включена часть сети, закладываемой на водозаборах, в том числе в центре водозаборов, и по две скважины из основных створов за пределами "большого колодца". Дополнительно закладываются одна-две скважины между водозаборами для оценки их взаимодействия. Таким образом, региональная опорная сеть будет включать скважины на естественный, слабо и сильно нарушенный режимы.

Для изучения распространения загрязнений в направлении водозаборов от каждого источника загрязнения (промышленный объект, животноводческий комплекс, населенный пункт, сброс или захоронение промстоков, поля фильтрации, хвосто- и шламохранилища и т. д.) сооружается створ скважин, если максимально возможное расчетное время подтягивания контура некондиционных вод меньше амортизационного времени работы водозаборов. Если источники загрязнения находятся вне воронок депрессии, то створы из двух-трех скважин ориентируются от них вниз по потоку для контроля распространения развития загрязнений. Расстояния между скважинами корректируются расчетными скоростями продвижения фронта загрязнений. Скважины закладываются в зонах повышенной проницаемости. Аналогичным образом размещаются створы скважин и при возможном подтягивании к водозаборам некондиционных природных вод как в напорных, так и в безнапорных условиях.

По данным В.М. Гольдберга, скорости движения загрязненных вод изменяются от десятков до 300 м/год. Поэтому расстояния между скважинами в таких региональных створах примарно 0,3—0,5 км. Количество скважин в процессе наблюдений за продвижением фронта загрязнений наращивается.

Наблюдения за подземными водами дополняются данными наблюдений за режимом поверхностных вод, атмосферы и почвенной влаги, т. е. они должны быть составной частью общей системы наблюдений за природной средой. Наиболее совершенные региональные модели учитывают взаимосвязь всех этих элементов. Вопросы управления водными ресурсами также решаются в их взаимосвязи.

Глава 3
ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ

Наблюдения за режимом подземных вод в связи с их эксплуатацией являются одним из главных компонентов общей системы наблюдений за окружающей средой, где подземные воды являются элементом и гидросферы и литосферы. Поэтому в комплексе наблюдений, необходимых для изучения влияния водоотбора подземных вод на среду, должны входить наблюдения за гидродинамическим режимом уровней, напоров и расходов подземных вод, гидрохимическим режимом в зоне водозабора, раз-

витием загрязнений подземных вод, геотемпературным режимом подземных вод и пород, за режимом эксплуатации подземных вод, а также за состоянием окружающей среды. Существенное значение в получении качественной информации о режиме подземных вод имеет качество технического состояния наблюдательной сети, которое также должно периодически контролироваться.

Указанный комплекс наблюдений принципиально важен и может быть включен в состав всех категорий наблюдательной сети — контрольной, специализированной, опорой ключевой и региональной. Однако наблюдения на разных категориях сети могут проводиться по различным программам. Так, на контрольной сети в минимально необходимый комплекс наблюдений входят наблюдения за режимом водоотбора, уровней и качеством вод в процессе эксплуатации, а также за техническим состоянием сети. В комплекс наблюдений специализированной сети входят изучение режима уровней подземных вод и дебитов родников в естественных и нарушенных условиях, изучение качества подземных вод в естественных условиях в зоне возможного влияния водозабора, в процессе опытных работ и за период эксплуатации водозабора, а также наблюдения за режимом водоотбора при переоценке запасов подземных вод по действующим водозаборам. Лишь по опорной ключевой и региональной сетям комплекс наблюдений должен быть полным с обоснованием возможного его сокращения в случае нецелесообразности проведения того или иного вида работ.

Рассмотрим особенности проведения указанных видов наблюдений.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под гидродинамическим режимом подземных вод понимается поведение во времени уровней грунтовых и напорных вод и дебитов родников.

Особенности производства наблюдений за режимом уровня (или напоров) подземных вод заключаются в следующем.

1. Режим подземных вод в районах водозаборов отличается высокой динамичностью и определяется не только естественными режимообразующими факторами, но и главным образом режимом водоотбора. Водоотбор по различным причинам бывает неравномерным. Он может резко сокращаться в ночные часы, в воскресные и особенно в праздничные дни, а также в периоды ремонта или профилактики насосного оборудования. В летние месяцы водоотбор нередко возрастает, а в зимние сокращается, но вместе с тем размеры его из года в год растут. Все это предопределяет исключительную динамичность уровней подземных вод, особенно в центральных частях водозаборов, которая постепенно сглаживается по мере удаления от центра воронки депрессии (рис. 4, *а*).

Наблюдения за режимом уровней подземных вод в таких условиях должны быть частыми, а при возможности даже непрерывными. Остановки в работе водозабора, резкие сокращения или увеличения водоотбора дают возможность использовать данные наблюдений за режимом восстановления или снижения уровня подземных вод для определения гидрогеологических параметров пласта. Для производства таких наблюдений

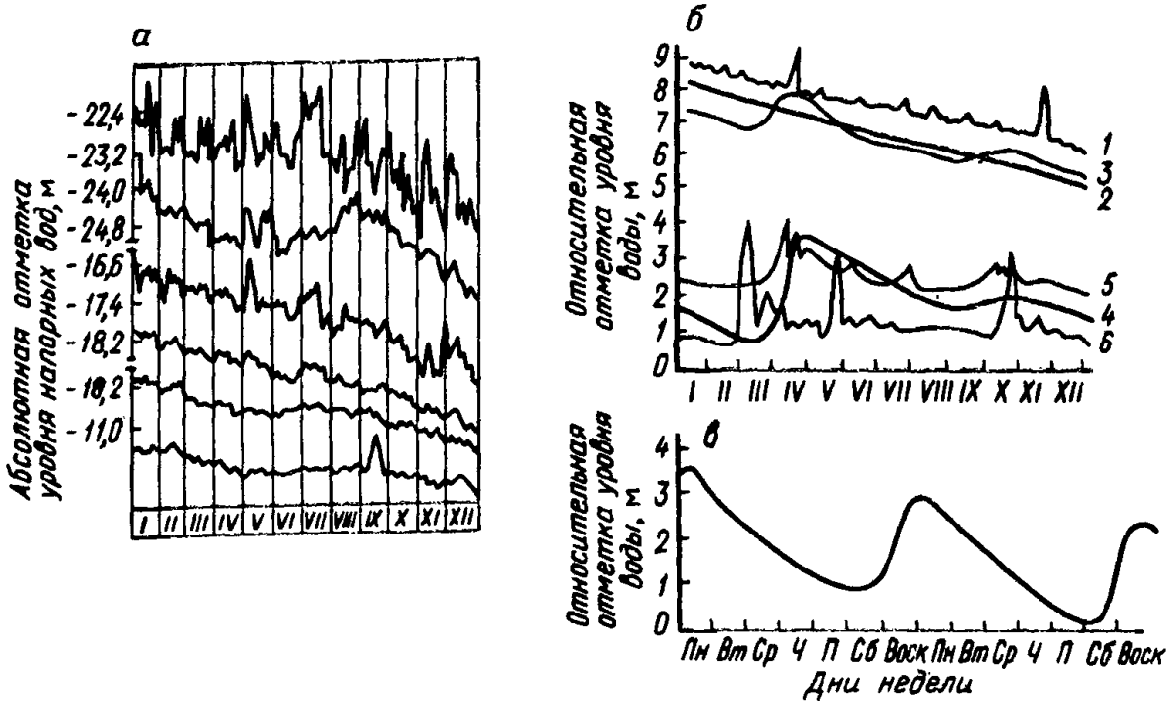


Рис. 4. Графики гидродинамического режима подземных вод в районе водозаборов.
а — по мере удаления от центра водозабора (сверху вниз); *б* — внутригодовой режим уровней в различных условиях; *в* — режим уровней в течение недели. *1 — 6* — типы режимов подземных вод, характерные для: *1* — артезианских бассейнов платформенного типа, замкнутых котловин и изолированных переуглубленных долин; *2* — то же, и для линз пресных вод с отсутствием питания; *3* — артезианских бассейнов платформ и межгорных впадин с перетеканием из грунтовых вод или привлечением вод из областей питания, подозерных надмерзлотных таликов, замкнутых структур трещинно-карстоаых вод, линз пресных вод с наличием сезонного питания, ледниковых отложений; *4* — речных долин второго и третьего типов, месторождений трещинно-карстовых вод с наличием регулирующей емкости; *5* — речных долин первого типа:; *6* — месторождений трещинно-карстовых вод при отсутствии регулирующей емкости

целесообразнее использовать самописцы, обеспечивающие непрерывную регистрацию уровней и позволяющие более качественно анализировать режим работы водозабора. Применение некоторых методов определения гидрогеологических параметров (например, по барометрической эффективности, по "точке перегиба" и др.) практически невозможно без непрерывной записи колебаний уровня подземных вод.

2. Сроки наблюдений за режимом уровня подземных вод в тех условиях, когда наблюдательная сеть не оборудована самописцами, должны быть увязаны с закономерностями формирования режима подземных вод в условиях водозабора. На рис. 4, *б* приведены графики, характеризующих шесть типов режима уровней подземных вод, в той или иной форме проявляющиеся практически на всех водозаборах.

Первый тип режима подземных вод характерен для закрытого артезианского бассейна при отсутствии перетекания в условиях неограниченного пласта со значительно удаленными областями питания. Сезонные колебания уровней в этом случае, как правило, отсутствуют и в силу

того, что водозабор работает главным образом за счет упругих запасов и используется в основном для технического водоснабжения, каждая остановка или сокращение водозабора в выходные и праздничные дни фиксируется резким подъемом уровней. На графике (см. рис. 4, *в*) показан характер режима уровней подземных вод в районе такого водозабора в течение недели. Из этого графика видно, что наблюдения за режимом уровня в таких условиях необходимо и достаточно производить дважды в неделю: в субботу или пятницу днем и в понедельник рано утром, когда можно зафиксировать максимальное и минимальное положение уровней в течение недели. Такие замеры обеспечивают составление графиков режима с необходимой для практических целей детальностью. Аналогично проводятся замеры в предпраздничный и послепраздничный дни.

Второй тип режима характеризует аналогичные условия, но при этом водозабор используется для питьевого водоснабжения и работает без остановок с постоянным дебитом. Наблюдения за режимом уровня в таких условиях можно производить не чаще одного раза в 10 дней.

Третий тип режима характеризуется резким влиянием на режим как естественных, так и искусственных факторов. Такой тип режима наблюдается в областях питания напорных вод в межгорных впадинах, межморенных горизонтах и чаще всего в грунтовых водах на междуречьях. На фоне общего снижения уровня подземных вод под влиянием водоотбора отмечаются четкие подъемы уровня в периоды питания подземных вод за счет инфильтрации талых вод весной и атмосферных осадков осенью. Таким образом, имеют место периодическое частичное сезонное восполнение запасов подземных вод, которое играет стабилизирующую роль, и постоянное снижение уровня напорных вод, так как размер водоотбора превышает величину сезонного восполнения. Поэтому четкая зависимость снижения уровней от времени проявляется лишь в период, когда питание отсутствует. Если сезонное питание осуществляется за счет перетекания из речных долин или из грунтовых вод, по мере развития воронки депрессии отмечается увеличение сезонных амплитуд колебаний уровней, что может определить тенденцию к стабилизации уровней напорных вод. Наблюдения за режимом уровня подземных вод в таких условиях необходимо производить 10 раз в месяц в периоды питания и один раз в декаду в периоды его отсутствия.

Четвертый тип режима характеризуется сработкой запасов и соответствующим снижением уровней подземных вод в периоды отсутствия питания и восстановлением уровней и, следовательно, запасов подземных вод в периоды питания главным образом в весеннее время. На отдельных месторождениях полное восстановление уровней может отмечаться ежегодно, на других — раз в несколько лет. Наблюдения за режимом уровня здесь надо производить также два раза в неделю, а в периоды паводка — ежедневно.

Пятый тип режима характеризуется тем, что эксплуатация подземных вод не приводит к каким-либо видимым изменениям в особенностях их режима в процессе эксплуатации. Такие случаи наблюдаются в районах инфильтрационных водозаборов, когда водоносный горизонт гидравли-

чески хорошо связан с рекой. Характер режима подземных вод здесь по-прежнему определяется особенностями режима реки. Однако амплитуды сезонных колебаний уровней значительно увеличиваются. Аналогичный характер режима уровней можно наблюдать в межгорных впадинах с обильным восполнением запасов за счет перетекания из вышележащих горизонтов и за счет инверсии родников. Сроки производства наблюдений за режимом подземных вод в данном типе месторождений должны быть при этом такими же, как и при наблюдениях за естественным режимом.

Для шестого типа гидродинамического режима характерно полное сохранение естественного режима. Такие случаи имеют место при каптаже источников, выходящих из трещинно-карстовых отложений при отсутствии какой-либо регулирующей емкости, т. е. когда водоотбор не в состоянии изменить баланс водоносного горизонта.

Понижения уровней подземных вод по отдельным эксплуатационным скважинам отличаются от понижений в "большом колодце" водозабора. В тех случаях, когда водозабор состоит из ряда эксплуатационных скважин, помимо региональной воронки депрессии с понижением S_0 (рис. 5, *а*), образовавшейся от работы всего водозабора, вокруг каждой скважины образуются воронки депрессии. Кроме того, как известно, между уровнем воды в скважине и в затрубном пространстве имеется разрыв, размеры которого определяются размерами сопротивления фильтра, а также другими причинами (переходом от ламинарного движения в пласте к турбулентному движению в скважине и др.). Особенно существенны размеры таких скачков уровней в эксплуатационных скважинах, использующих грунтовые воды. Несмотря на то что для всех расчетов, принимая водозабор за "большой колодец", берутся значения понижений лишь региональной воронки депрессии S_0, важно также знать положение динамического уровня в районе каждой скважины и в самих эксплуатационных скважинах. Такиа сведения имеют большое значение для эксплуатационных скважин, заложенных в водоносных горизонтах малой мощности,

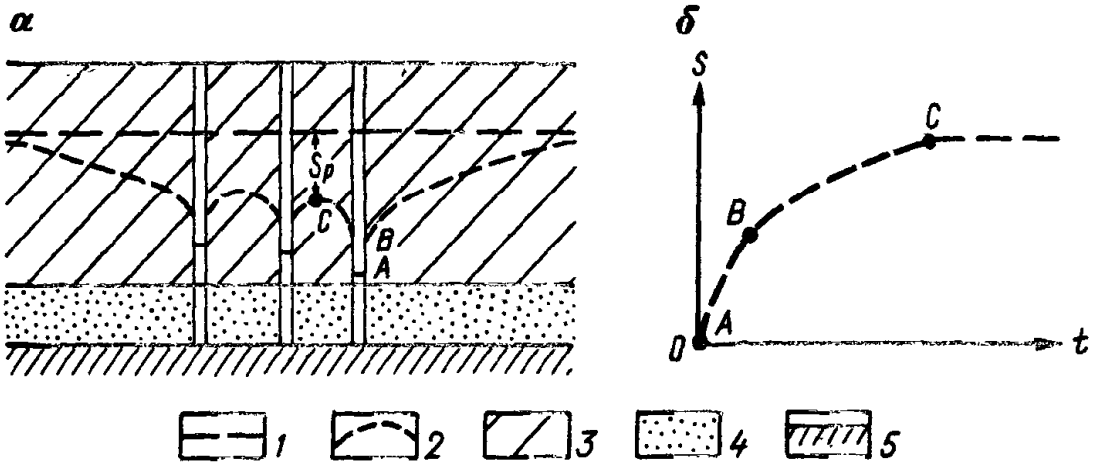


Рис. 5. Схема положения уровней подземных вод в районе действующего водозабора (*а*) и график их восстановления при сокращении или остановке водоотбора (*б*).

1 — статический уровень; *2* — динамический уровень; *3* — слабопроницаемые породы; *4* — водонасыщенные породы; *5* — водоупор

когда уменьшение столба воды в самой скважине может привести к резкому снижению дебита водозабора, хотя понижение в пределах региональной воронки депрессии еще не достигло допустимого.

По данным восстановления уровня подземных вод в центре воронки депрессии может быть получена характеристика динамического уровня в самой эксплуатационной скважине, в сформировавшейся вокруг нее воронке и общего понижения уровня в центральной части "большого колодца" по соответствующим уровням в точках *А, В* и *С* (см. рис. 5, *б*). Получить достаточно достоверные сведения о динамическом уровне в эксплуатационных скважинах не всегда легко. Связано это с тем, что далеко не всегда при оборудовании эксплуатационных скважин предусматривается необходимость наблюдений за уровнями по этим скважинам. В результате зазоры между фланцами водоподъемных и обсадных труб бывают настолько малы, что производство каких-либо наблюдений в них исключается. В таких случаях для наблюдений могут быть использованы лишь резервные или специальные наблюдательные скважины, а также произведены разовые замеры в периоды ремонта скважин.

Наблюдения в эксплуатационной скважине осуществляются в следующем порядке:

а) замеряется динамический уровень в самой скважине до отключения насоса (определение точки *А*);

б) после отключения насоса производятся наблюдения за восстановлением уровня путем последовательных замеров через 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 45 мин и т. д. Одновременно с замерами строится график восстановления уровня (см. рис. 5, *б*). В первые минуты восстановление происходит очень быстро (несколько минут), так как заполняется та часть скважины, которая определяется размерами "скачка". Определить его величину можно по первой точке перегиба *В* кривой восстановления, после которой начинается как бы заполнение воронки депрессии, развитой непосредственно вокруг эксплуатационной скважины. Вторая точка перегиба *С* свидетельствует о том, что уровень восстановился до уровня региональной воронки депрессии. После этого, в зависимости от характера эксплуатации, уровень в наблюдательной скважине может несколько восстановиться либо стремиться к стабилизации в зависимости от интенсивности водоотбора или начнет вновь снижаться.

Продолжительность такого замера в каждом случае может быть различной и устанавливается каждый раз опытным путем с помощью построения аналогичных графиков. После определения второй точки перегиба замеры могут быть прекращены. В тех случаях, когда восстановление уровня до точки перегиба *С* длится часами, а по техническим причинам остановка насоса на столь длительное время недопустима, положение региональной воронки депрессии должно определяться по специальным наблюдательным скважинам, расположенным в пределах "большого колодца" водозабора.

Для определения указанных уровней замеры должны производиться последовательно в каждой скважине в отдельности, когда остальные скважины водозабора работают. Тогда отключение одной из скважин существенно не скажется на положении региональной воронки депрессии.

Наблюдения за режимом уровня по самоизливающим скважинам производятся с помощью манометров или путем наращивания труб и наблюдения за восстановлением уровней в них. Характер расчленения графика восстановления аналогичен вышеописанному.

3. Особенно сложны наблюдения за режимом подземных вод в скважинах, вскрывших сразу несколько водоносных горизонтов. Из-за слабой водообильности и малой мощности отдельных горизонтов скважины закладываются иногда одновременно на двух-пяти и более водоносных горизонтов, характеризующихся разными фильтрационными свойствами и уровнями. В скважине устанавливается средний уровень, не отражающий величины напоров ни одного из вскрытых водоносных горизонтов. Поэтому судить об особенностях развития воронки депрессии по каждому из водоносных горизонтов не представляется возможным. Наблюдения в этих случаях должны производиться по возможности в каждом горизонте в отдельности. Если это невозможно по каким-либо техническим причинам, то установить величины напоров по каждому из горизонтов можно, лишь зная удельные дебиты каждого из этих горизонтов и уровень в одном из горизонтов, используя формулу Е.А. Минкина

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i h_i}{\sum_{i=1}^{n} q_i}, \qquad (3.1)$$

где h — результирующий напор в скважине, вскрывшей несколько горизонтов; h_i — напоры в отдельных горизонтах; q_i — удельные дебиты горизонтов; n — число горизонтов.

Для определения h необходимо сначала выбрать скважину, вскрывающую два горизонта, уровень по одному из которых известен, и по формуле (3.1) определить второй. Затем по скважине, вскрывшей три горизонта, уровень по одному из которых известен, а по другому рассчитан, надо определить уровень третьего неизвестного горизонта и т. д.

4. При изучении возможной инверсии скрытой разгрузки подземных вод на испарение важно в таких зонах установить наблюдения по этажно расположенным пьезометрам. Наблюдения за режимом уровней подземных вод в пьезометрах надо проводить либо непрерывно самописцами, либо как минимум четыре раза в сутки. Учитывая временной сдвиг в режиме температур с глубиной (а следовательно и в эвапотранспирации), на первом этапе проводятся наблюдения за режимом температур и уровней по каждому из трех пьезометров, устанавливается характерный для данной глубины суточный ход режима и затем определяется оптимальное время отбора для фиксации минимальных, максимальных и промежуточных между ними суточных колебаний уровней подземных вод. Методика оценки питания и разгрузки подземных вод по таким пьезометрам рассмотрена ниже.

5. Наблюдения за режимом водоотбора должны производиться в те же сроки, что и наблюдения за режимом уровней (или напоров) подзем-

ных вод. После того, когда в результате наблюдений будет установлена четкая зависимость (графическая или аналитическая) режима уровней (понижений) от размеров водоотбора, замеры расходов, если это связано с техническими трудностями, можно несколько разрядить, так как они могут быть восстановлены по выявленной зависимости.

6. Замеры расходов родников проводятся после их соответствующего каптажа, исключающего неоднородность условий измерений в процессе всего срока наблюдений. Измерения дебитов родников проводятся по водосливам любого типа (прямоугольным, треугольным). Каптажное устройство и водослив не должны создавать подпора на выходе родника. Замеры дебитов родников проводятся десять раз в месяц в отсутствии питания и ежедневно в периоды интенсивного сезонного питания. На карстовых родниках и родниках, выходящих из лавовых отложений, характеризующихся высокой динамичностью и реагирующих на выпадение почти любых атмосферных осадков, измерения целесообразно производить самописцами. Последние устанавливаются у водослива, измеряя уровень в нем, который затем пересчитывается на расход по соответствующим таблицам или графикам.

7. Для изучения режима подземного стока при региональных оценках ресурсов подземных вод используются данные существующих наблюдений за поверхностным стоком. Если аналогичная задача ставится в районе конкретного водозабора, на участке которого отсутствуют гидрометрические створы, подобные наблюдения должны быть организованы на период разведочных работ. Результаты этих коротких рядов наблюдений должны быть увязаны с длинными рядами наблюдений по постам Гидрометеослужбы для получения необходимых расчетных характеристик подземного стока (среднемноголетних или минимальных многолетних). Способы анализа гидрографа рек для определения внутригодового режима подземного стока рассмотрены ниже.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Изучение режима температур подземных вод, а также разделяющих их пород представляет особый интерес при анализе работы действующих водозаборов. Температура воды, как физическая характеристика, не лимитируется ГОСТ 2874—82 и поэтому с позиций качества воды, как правило, не изучается. Такие наблюдения проводятся преимущественно в исследовательских целях, связанных с особенностями работы водозабора. Например, наблюдения за режимом температур подземных вод и пород проводятся для выявления возможности промерзания подземных вод и перемерзания рек, для определения величин перетекания через разделяющие слои, изучения динамики подземных вод в условиях подпитывания из реки или искусственных водоемов, определения составляющих питания подземных вод, изменений границ горизонта в зоне развития мерзлоты и т. д.

Сроки производства наблюдений за режимом температуры подземных вод в районах водозаборов должны быть связаны с особенностями гидро-

геологических условий территории, глубинами залегания подземных вод от поверхности земли и теми задачами, которые ставятся перед термометрическими исследованиями.

Как известно, с глубиной амплитуды колебаний температур затухают. В платформенных условиях, например на глубинах 25–30 м, амплитуды сезонных колебаний температур подземных вод, как правило, не превышают 1 °С. На этом основании ряд исследователей считает, что ниже указанных глубин располагается "зона постоянных температур".

Наблюдениями последних лет при использовании более совершенной и точной термометрической аппаратуры установлено, что колебания температуры подземных вод, измеряемые сотыми и даже десятыми долями градуса, фиксируются и до более значительных глубин в зависимости от степени активности водообмена [21, 39 и др.]. Однако для практических целей систематических замеров температур в таких условиях в большинстве случаев производить не следует. Для получения представлений о внутригодовом распределении температур подземных вод достаточно провести одногодовой цикл наблюдений. Сроки замеров температур (если термометрические исследования не используются для решения каких-либо специальных вопросов) в зависимости от глубин залегания подземных вод должны быть следующими: при глубине 10–15 м – два раза в неделю (т. е. в те же дни, в которые производятся замеры уровня), при глубине 15–30 м – раз в декаду, глубже 30 м – один раз в месяц. Температура замеряется или на уровне середины фильтра (по наблюдательным скважинам), или в струе откачиваемой воды (в трубах). В районах крупных городов и ТЭЦ могут отмечаться так называемые "тепловые загрязнения" подземных вод, с помощью изучения развития во времени которых можно оконтурить области распространения химических и бактериальных загрязнений подземных вод.

В сложных гидрогеологических условиях, где в процессе эксплуатации подземных вод возможны изменения граничных условий эксплуатируемого водоносного горизонта (расширение талой зоны, образование гидравлических окон, перемерзание реки в связи с перехватом большей части ее расхода и т. д.) наблюдения следует проводить вдоль всего ствола скважин как в обводненной, так и в необводненной зоне независимо от обсадки скважин. Такие наблюдения проводятся по створам наблюдательных скважин, направленным от центра водозабора к границам пласта.

Широкие возможности открывают гидрогеотермические наблюдения для изучения взаимодействия поверхностных и подземных вод как на стадиях поисков и разведки подземных вод, так и при анализе работы действующих водозаборов.

Так, измерения температур воды в реке в придонном слое позволяют вскрыть области скрытой разгрузки трещинно-карстовых вод. Такие наблюдения выполняются непрерывно вдоль реки в летнее время, т. е. в период наибольшей контрастности температур подземных и поверхностных вод [47]. По снижению температур воды в реке выделяются зоны повышенной трещиноватости пород, что служит обоснованием выбора местоположения эксплуатационных скважин на водозаборах.

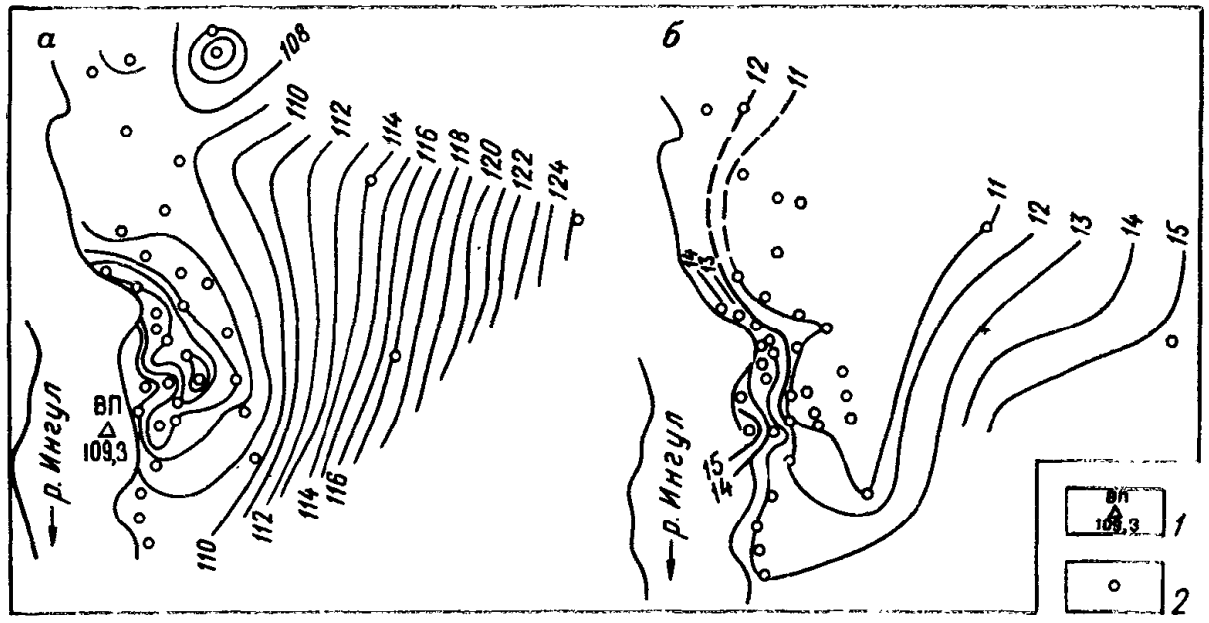


Рис. 6. Карты гидроизогипс (*а*) и изотерм (*б*) подземных вод в районе инфильтрационного водозабора (по материалам треста "Киевгеология").

1 — водомерный пост и его номер; *2* — скважина.
Цифрами даны: на карте гидроизогипс — абсолютные высоты в метрах; на карте изотерм — температуры в градусах Цельсия

Аналогичным образом наблюдения за режимом температуры подземных вод в районе инфильтрационных водозаборов и построение карт изотерм водоносного горизонта дают возможность наглядно определить особенности взаимодействия поверхностных и подземных вод, выявить основные участки, где движение более теплых (летом) или более холодных (зимой) речных вод наиболее интенсивно. Все эти сведения позволяют делать на этой основе выводы, например, о степени заиленности русла реки, о возможных участках для расширения водоотбора как путем бурения дополнительных скважин, так и путем увеличения понижения на участках наилучшей взаимосвязи поверхностных и подземных вод, о наиболее вероятных участках появления загрязнений и т. д. На рис. 6 видно, как конфигурация гидроизогипс в районе одного из инфильтрационных водозаборов четко увязывается с конфигурацией изотерм подземных вод. Подобные карты могут быть составлены для разных глубин с тем, чтобы изучить особенности фильтрации воды к водозабору.

Изменения температур по всему стволу наблюдательных скважин на таких инфильтрационных водозаборах позволяют выявить зоны с повышенными и пониженными фильтрационными свойствами и выбрать тем самым зоны гидрохимического опробования, где наиболее вероятно появление загрязнений. Такие же вертикальные изменения температур дают возможность изучить динамику потока подземных вод в районе водозабора, что особенно важно в зонах искусственного пополнения запасов подземных вод. Эти исследования позволяют оценить эффективность работы инфильтрационных бассейнов, управлять их режимом, определять сроки чистки и т. д.

Ввиду того, что эксплуатация приводит к взаимодействию вод различных водоносных горизонтов, характеризующихся различной температурой, или к взаимосвязи подземных вод с реками, пополняющими запасы подземных вод и также характеризующимися разной температурой воды, становится принципиально возможным установить по результирующей температуре количество воды, притекающей из других горизонтов или из реки. Например, при одновременной эксплуатации первого от поверхности напорного водоносного горизонта и гидравлически связанных с ним грунтовых вод разность температур этих горизонтов может достигать нескольких градусов. Соотношение расходов и температур при этом может быть выражено следующими уравнениями:

$$Q_1 t_1 + Q_2 t_2 = Q_3 t_3; \quad Q_1 + Q_2 = Q_3,$$

где Q_1 и Q_2 — количество воды, забираемое из первого и второго горизонтов; t_1 и t_2 — температура подземных вод первого и второго горизонтов до эксплуатации; Q_3 — суммарное количество откачиваемой воды; t_3 — температура откачиваемой воды.

Отсюда следует, что

$$Q_1 = Q_3 \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2}; \tag{3.2}$$

$$Q_2 = Q_3 \frac{t_1 - t_3}{t_1 - t_2}. \tag{3.3}$$

Если учесть, что $Q_1/Q_2 = (km)_1/(km)_2$ и, установив соотношение расходов, можно определить отношение водопроводимостей пластов по формуле

$$\frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_3} = \frac{(km)_1}{(km)_2},$$

где k — коэффициент фильтраций; m — мощность водонасыщенных пород; km — водопроводимость пласта.

Затем, зная суммарную водопроводимость или водопроводимость одного из пластов, можно определить водопроводимость каждого из них. По соотношению температур воды водоносного горизонта и реки могут быть также установлены соотношения размеров подтока грунтовых и речных вод к водозабору как в отдельные сезоны года, так и в многолетнем разрезе.

Как известно, в зависимости от соотношения размеров водоотбора и параметров водоносного горизонта могут существовать два основных случая взаимодействия подземных и поверхностных вод (по В.М. Гольдбергу).

1. Приток из реки в водозабор отсутствует. Положение точки перегиба A (см. рис. 7, *а*) на графике определяется по формуле

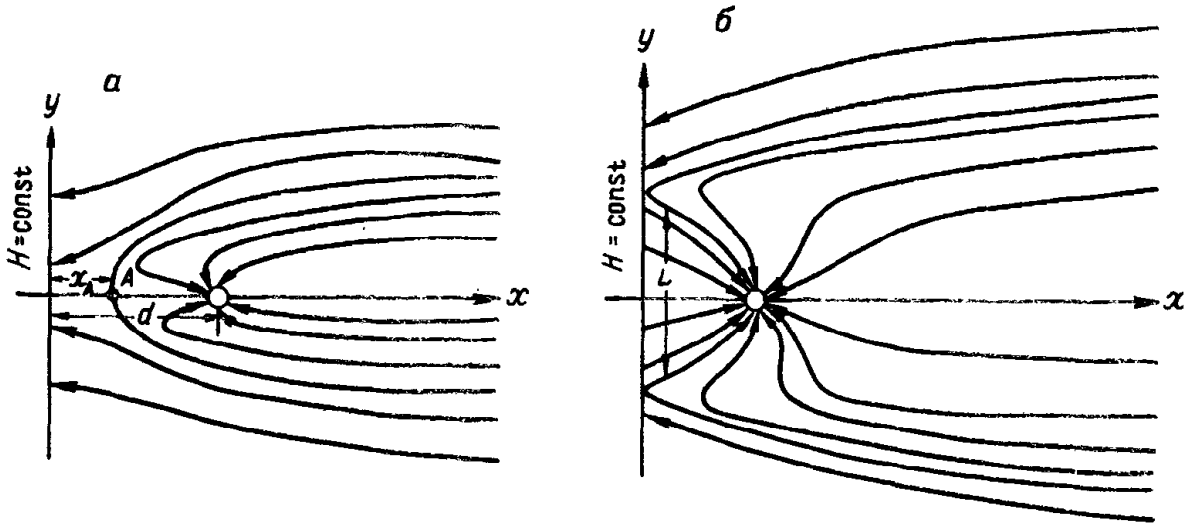


Рис. 7. Схемы линий тока подземных вод в условиях взаимодействия поверхностных и подземных вод при работе водозабора.

а — с наличием точки перегиба; *б* — без точки перегиба

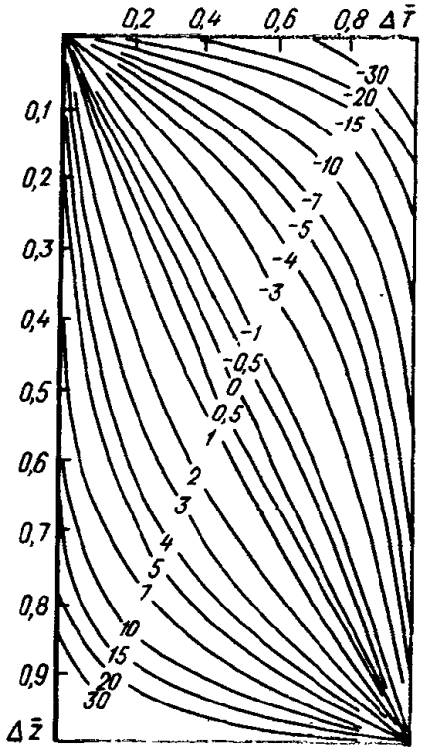


Рис. 8. Типовые кривые функции $f(\Delta T, \Delta z)$ (по Д. Бредеховту и И. Пападопулосу).

Цифры на кривых — значения β

$$x_A = \sqrt{d^2 - \frac{qd}{\pi v}}, \qquad (3.4)$$

где d — расстояние от водозабора до реки; $q = Q/h$ — удельный дебит водозабора; Q — дебит водозабора; h — мощность водоносного пласта; $v = ki$ — фиктивная скорость подземных вод; k — коэффициент фильтрации; i — уклон потока.

Если $x_A \neq 0$, т. е. имеется точка перегиба, то притока из реки нет (см. рис. 7, *а*).

2. Поступление в водозабор речных вод происходит при условии, если точка перегиба отсутствует, т. е. $d < \frac{Q}{\pi k i h}$.

В этом случае дебит водозабора складывается из притока речных вод и притока подземных вод со стороны берега (см. рис. 7, *б*). Ширина фронта поступления речных вод $L = 2y_0$. Величина y_0 находится подбором из уравнения

$$\frac{2y_0 d}{d^2 - y_0^2} = tg\,\pi\left(1 + \frac{2vy_0}{q}\right). \tag{3.5}$$

Максимальный расход речных вод $q_р$ в общем дебите водозабора определяется по формуле

$$q_р = \frac{q}{\pi}\,\mathrm{arctg}\frac{2y_0 d}{d^2 - y_0^2} - 2vy_0. \tag{3.6}$$

Определив, таким образом, размеры подтока речных вод, можно определить размеры подтока грунтовых вод по разности $Q_{гр} = Q - Q_р$ или путем подбора по формулам (3.2) и (3.3), где Q_3 — суммарный расход водозабора; t_3 — суммарная температура смещения речных и грунтовых вод; Q_1 и Q_2 — расходы соответственно грунтовых и речных вод, притекающих к водозабору; t_1 и t_2 — температуры воды речных и грунтовых вод.

Определение соотношений расходов речных и подземных вод целесообразно производить в летнее время, когда разность температур речных и подземных вод наибольшая; несколько хуже — в зимнее время.

Фильтрационные потери из реки могут быть изучены и непосредственными измерениями или по гидрологическим измерениям по створам выше и ниже водозабора, если точность измерений позволяет установить величину потерь, или при помощи специальных приборов инфильтрометров — погружных или плавающего типа [29]. Подобные контрольные измерения могут служить критерием достоверности расчетов, проведенных по температурным данным. Периодические наблюдения за температурами подземных вод и проводимые на их основе периодические расчеты соотношения расходов воды, поступающей из разных источников (горизонтов), помогут глубже изучить вопросы изменения баланса подземных вод в районе водозабора, установить и изучить характер перетекания подземных вод; оценить во времени степень кольматации пор в русле реки под влиянием эксплуатации и, следовательно, характер изменения условий на границах и дать на этой основе прогнозы изменений режима подземных вод под влиянием их эксплуатации. Измерения температур в разделяющем слое все шире используются для определения фильтрационных свойств слабопроницаемых отложений и перетекания через них [4, 39, 44]. В условиях стационарного распределения температур производятся измерения температур в пределах разделяющего слоя. Выпуклые вверх кривые распределения температур свидетельствуют о восходящем движении подземных вод, кривые выпуклостью вниз — о нисходящем движении, распределение температур по прямой — об отсутствии движения через

разделяющий слой (рис. 8). Скорость вертикальной фильтрации через разделяющий слой определяется по формуле

$$v = \frac{\lambda\beta}{c_в \rho_в m_0},$$

где λ — коэффициент теплопроводности пород, изменяющийся для глин от 1,4 до 2,2 Вт/(м · °С) в зависимости от степени их песчанистости; β — безразмерный параметр; $c_в$ — удельная теплоемкость воды, равная 4,2 · 10^3 Дж/(кг · К); $\rho_в$ — объемная масса воды, равная 10^3 кг/м^3, m_0 — мощность разделяющего слоя, м.

Величина β снимается с эталонного графика, построенного в координатах: относительное распределение температур $\overline{\Delta T}$ — функция относительного изменения глубины $\overline{\Delta z}$, сопоставлением эмпирически полученного распределения температур с соответствующей кривой β эталонного графика. При этом

$$\overline{\Delta T} = \frac{T_z - T_1}{T_2 - T_1}; \quad \overline{\Delta z} = \frac{z}{m_0},$$

где T_1 — температура в кровле разделяющего слоя; T_2 — температура в подошве разделяющего слоя; T_z — температура на глубине $z_м$ от кровли разделяющего слоя; z — глубина замера температур от кровли, м.

Затем, зная градиент напоров $\Delta H_0 = \Delta H/m_0$ в смежных горизонтах, определяют коэффициент фильтрации разделяющего слоя $k_0 = \frac{v}{\Delta H_0}$.

Проведение подобных наблюдений за режимом температур разделяющих слоев периодически в процессе длительной эксплуатации подземных вод позволит установить и изменчивость перетекания через разделяющие слои, и изменчивость фильтрационных свойств последних под влиянием снятия с них взвешивающего гидростатического давления. Особенно перспективны такие исследования на стадии эксплуатационной разведки.

По скорости распространения температуры в зоне аэрации под влиянием инфильтрации талых вод можно определить вертикальный коэффициент фильтрации слагающих зону аэрации пород.

Проведенные Н.М. Фроловым [39] термометрические наблюдения по ряду скважин показали, что наряду с общей тенденцией к затуханию сезонных амплитуд колебаний температур с глубиной имеют место отдельные участки, где амплитуды вниз по разрезу, наоборот, возрастают. Это объясняется степенью активности водообмена, меняющейся по вертикали. В результате даже в естественных условиях амплитуды колебаний температур на участках слабоводообильных и водоупорных пород уменьшаются, а ниже по разрезу на участках более трещиноватых и водообильных снова увеличиваются. В нарушенных условиях, особенно при водоотборе, эта закономерность проявляется еще более четко, так как водоотбор усиливает водообмен.

Подобный анализ термометрических наблюдений по вертикали должен явиться основой для расчленения однородных по геологическому строению горизонтов по их фильтрационным свойствам как для наиболее эффективной установки фильтров, так и для определения изменений гидрогеологических параметров по вертикали, особенно в неоднородных отложениях. Для этой цели наблюдения за режимом температуры должны производиться не на уровне установления фильтра, а по вертикали, независимо от того, обсажена скважина трубами или нет. Интервалы проведения наблюдений в различных гидрогеологических зонах могут быть разными в зависимости от степени неоднородности строения разреза. Для таких измерений температур по зонам могут быть использованы лишь специальные наблюдательные или резервные скважины.

ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Гидрогеохимические исследования, выполняемые на различных категориях наблюдательной сети, имеют и общие и специфические особенности.

Общим для всех видов наблюдений является оценка соответствия качества эксплуатационных или планируемых к эксплуатации подземных вод требованиям ГОСТ 2874–82, в соответствии с которым должны контролироваться следующие установленные нормы на основные показатели.

1. Бактериологические: общее количество микроорганизмов в 1 мм^3 = = 100; коли индекс < 3.

2. Токсичные, мг/л: $Be^{2+} < 0{,}0002$, $Mo^{2+} < 0{,}25$; $As^{3+,\,5+} < 0{,}05$; $NO_3^- < 45$; $Pb^{2+} < 0{,}03$; $Se^{6+} < 0{,}001$; $Sr^{2+} < 7$; $Al_{\text{остаточный}} < 0{,}5$; F^- от 0,7 до 1,5.

3. Органолептические: запах < 2 баллов; привкус < 2 баллов; цветность < 20 градусов; мутность $< 1{,}5$ мг/л.

4. Общие химические: сухой остаток < 1000 мг/л; $Cl^- < 350$ мг/л; $SO^{2-} < 500$ мг/л; $Fe^{2+,\,3+} < 0{,}3$ мг/л; $Mn^{2+} < 0{,}1$ мг/л; $Cu^{2+} < 1$ мг/л; $Zn^{2+} < 5{,}0$ мг/л; полифосфаты $(PO_4)^{3-} < 3{,}5$ мг/л; общая жесткость < 7 ммоль/л; pH от 6 до 9.

По согласованию с местными санитарными органами с учетом местных природных особенностей допускается изменение требований к воде по ряду показателей: сухой остаток $< 1{,}5$ г/л, жесткость 10 ммоль/л, Mn $<$ $< 0{,}5$ мг/л, F – не фторировать при низких концентрациях F, цветность $< 35°$, мутности в паводок < 2 мг/л. Вода не должна содержать видимых невооруженным глазом микроорганизмов. Содержание ионов Cl^- и SO_4^{2-} в долях от предельно допустимых концентраций (ПДК) не должно превышать единицы. Местные санитарно-эпидемиологические станции (СЭС) определяют состав возможных загрязнений в районе, который должен затем систематически определяться. Концентрации загрязнений не должны превышать ПДК, утвержденных ГОСТ 2874–82.

Изучение возможной загрязненности подземных вод представляет особую сложность, так как на сегодня известно уже несколько тысяч различных соединений загрязняющих среду в целом и подземные воды

в частности. Для большей части из этих соединений пока даже не установлены их возможные ПДК. Поэтому на конкретных водозаборах изучаются лишь наиболее вероятные ингредиенты, а на региональной сети — некоторые обобщенные показатели, такие как перманганатная и бихроматная окисляемость, биохимическое потребление кислорода (БПК).

На контрольной наблюдательной сети проводится систематическое изучение соответствия качества отбираемой и подаваемой потребителям воды требованиям ГОСТа. Частота отбора проб на анализ различна для различных ингредиентов. Так, бактериологический состав воды при численности населения до 20 тыс. человек определяется не реже одного раза в месяц, а при численности до 50 тыс. человек — два раза в месяц, если качество вод высокое и обеззараживание не применяется. В противном случае отбор проб на анализ при численности населения до 20 тыс. человек производится не реже одного раза в неделю, при населении до 50 тыс. человек — три раза в неделю, а для крупных городов (свыше 50 тыс. человек) — ежедневно. Ежедневно в этом случае определяется и остаточный хлор. Общий химический состав изучается в течение первого года эксплуатации четыре раза в год (по сезонам года), а затем не реже одного раза в год в наиболее неблагоприятный период по результатам первого года наблюдений. При проведении на водозаборах специальной обработки воды (обезжелезивание, умягчение, фторирование, озонирование и пр.) проводится также ежедневный контроль за эффективностью обработки.

На специализированной наблюдательной сети, создаваемой в период поисков и разведки подземных вод, изучение качества подземных вод заключается: в оценке его изменчивости по сезонам года; проведении опытных откачек, особенно в периоды длительных эксплуатационных выпусков, выявлении существующих или потенциальных очагов загрязнений; прогнозах возможного изменения качества воды во времени; обосновании зон санитарной охраны вокруг водозабора.

Оценка изменения химического состава подземных вод проводится по всей зоне возможного влияния водозабора. Частота отбора проб воды на анализ должна быть обоснована исходя из региональных закономерностей гидрохимического режима подземных вод. В зависимости от климатических особенностей могут быть встречены два типа сезонного гидрохимического режима: 1) когда в процессе инфильтрационного питания происходит снижение минерализации подземных вод за счет их разбавления более пресными инфильтрационными водами; 2) когда в процессе инфильтрационного питания наблюдается увеличение минерализации подземных вод за счет выноса солей из засоленной зоны аэрации. В первом случае имеет место прямая, во втором — обратная связь между колебаниями уровней и минерализацией подземных вод. Существенные изменения в гидрохимический режим могут вносить искусственные мероприятия и прежде всего орошение и промывка почв. Во всех случаях отбор проб воды на анализ согласуется с режимом уровней подземных вод и приурочивается к эстремальным его положениям по сезонам, т. е. к периодам всех внутригодовых минимумов и максимумов уровней.

Для изучения влияния водоотбора на возможные изменения качества подземных вод пробы воды на анализ отбираются как в начале, так и в конце откачек, особенно наиболее продолжительных. Эффективность выполнения такой задачи может быть проверена контрольным расчетом возможной скорости подтока некондиционных вод со стороны потенциального источника загрязнения (реки, населенного пункта, промышленного предприятия, сельскохозяйственных земель, животноводческих комплексов). Такой расчет может определить и необходимую для этих целей продолжительность откачки. Качество подземных вод в районе каждого потенциального источника загрязнений должно быть изучено и определены контуры загрязненных вод, их состав и концентрации. Уже на этой стадии важно выявить начавшийся процесс загрязнения подземных вод. Под загрязнением понимается сформировавшееся или постоянно увеличивающееся изменение свойств воды в результате антропогенного воздействия (химического, физического, органолептического, биологического) по сравнению с ее состоянием в естественных условиях. Эти изменения могут находиться в начальной стадии намного ниже ПДК и вода в этом случае считается пригодной для использования. Поэтому вскрыть произошедшие изменения и оценить темпы развития процесса загрязнения можно лишь на основе сопоставлений гидрогеохимического режима изучаемого участка с фоновым заведомо естественным режимом, а также на основе систематических наблюдений за режимом химического состава за весь период проведения предварительной и детальной разведок, что делается далеко не всегда.

Для изучения подсоса некондиционных вод снизу требуется соорудить куст специальных ярусных наблюдательных скважин.

При откачках в районе реки наблюдения за качеством вод следует вести и по наблюдательным скважинам между рекой и водозабором, что позволит установить процесс возможного самоочищения речных вод главным образом от бактериального загрязнения и определить по этому критерию оптимальное расстояние водозабора от реки.

На специализированной наблюдательной сети, создаваемой для переоценки запасов подземных вод на действующих водозаборах, проводится сопоставление многолетних изменений качества подземных вод в районе водозабора по данным анализов периода разведки, начала эксплуатации и переоценки запасов. С учетом этих данных оцениваются и уточняются прогнозы возможного изменения качества подземных вод во времени, определяется, если необходимо, программа гидрогеохимических исследований на будущее и формируются природоохранные мероприятия по оздоровлению среды и предотвращению ухудшения качества подземных вод.

Аналогичные вопросы решаются и на опорной ключевой наблюдательной сети. Однако здесь при наличии многолетних режимных наблюдений представляется возможным изучить динамику изменчивости качества подземных вод и по сезонам года и за многолетие. В программу гидрогеохимического опробования, помимо установленных ГОСТом ингредиентов, рекомендуется дополнительно включать определения Eh, кремнекислоты,

общего органического углерода CO_2, окисляемость перманганатную, а также содержание ртути, кадмия, бензапирена и хлор-органических пестицидов [27].

Корректировка программ исследований осуществляется в соответствии с существующими в регионе природными и техногенными предпосылками для появления тех или иных компонентов в подземных водах. Так, в зонах промышленных предприятий и городских агломераций, помимо отмеченных выше компонентов, целесообразно определять также содержание нефтепродуктов, летучих фенолов, поверхностно-активных веществ (СПАВ), ванадия, никеля, хрома. В зонах складирования или транспортировки нефтепродуктов — летучие фенолы, общий показатель содержания органических веществ, оцениваемый по химически поглощенному кислороду, определенный хроматичным способом ($ХПК_{хр}$), ион аммония, нафтеновые кислоты, сероводород. В районах сельскохозяйственных мелиораций дополнительными компонентами служат общие показатели содержания органических веществ — $ХПК_{хр}$, $ХПК_{м}$ — определенный манганатным способом, показатели наиболее устойчивых и токсичных пестицидов (хлорсодержащих, ртутно-органических, мышьяковистых). Учитывая способность пестицидов накапливаться и существовать в подземных водах длительное время, целесообразна проверка содержания в них ранее применявшихся и впоследствии запрещенных (ДДТ, алдрин, меркаптафос и др.). Содержание суммы всех токсичных компонентов (за исключением фтора, нитратов и радиоактивных веществ) в долях от максимально допустимых не должна превышать единицы. Расчет ведется по формуле $c_1/C_1 + c_2/C_2 + \ldots + c_n/C_n \leqslant 1$, где c_1, c_2, ..., c_n — обнаруженные концентрации в мг/л; C_1, C_2, ..., C_n — установленные для этих компонентов ПДК в мг/л. Это соотношение в процессе эксплуатации может изменяться и поэтому периодически должно проверяться.

В сложных гидрогеохимических условиях (например, при близком расположении к водозабору контура соленых или загрязненных вод, в условиях эксплуатации линз пресных вод, плавающих на соленых, и т. д.) наблюдения целесообразно вести по кустам скважин с ярусно расположенными фильтрами. При изучении продвижения к водозабору некондиционных вод с бóльшей, чем у пресных вод, плотностью (морские воды вблизи побережий, калийный соли), опробованию подлежат нижние и наиболее проницаемые части водоносного горизонта, а с мéньшей плотностью (углеводороды, СПАВ и др.) — верхние части водоносного горизонта.

Сроки отбора проб на анализ должны быть увязаны с особенностями сезонного режима, если таковой прослеживается, и приурочены к экстремальным положениям уровней. При отсутствии сезонного режима уровней и угрозы подтока некондиционных вод отбор проб может осуществляться раз в год. С увеличением же угрозы ухудшения качества вод частота отбора проб должна постепенно увеличиваться и может достигать ежемесячного и более частого опробования. В этом случае сроки опробования корректируются сроками продвижения загрязнений к водозабору или к его крайним наблюдательным скважинам.

Программа гидрогеохимического опробования по опорной региональной сети включает в себя перечень всех общих компонентов качества вод, лимитируемых ГОСТом, а также вероятный состав микрокомпонентов и загрязняющих веществ, характеризующих региональный гидрохимический фон, связанный как с антропогенными воздействиями, так и с природными особенностями региона. В первую очередь здесь должны быть учтены наиболее распространенные виды загрязнений — хлориды, нитраты, углеводороды и тяжелые металлы. Программа таких исследований уточняется в процессе работ. В нее включаются компоненты не только содержащиеся в концентрациях выше и ниже ПДК, но и имеющие тенденцию к увеличению.

Весьма существенное влияние на качество подземных вод оказывает загрязнение атмосферы, которое приобретает региональный характер. Основными ингредиентами здесь являются окись углерода, соединения серы и азота, углеводороды. Соединение окислов серы и азота с влагой атмосферы приводит к образованию известных "кислых дождей".

Соединение таких аномальных по отношению к фоновым концентрациям компонентов требует наблюдений за их развитием во времени и пространстве, даже если они находятся много ниже ПДК.

Гидрохимические наблюдения по региональной сети, неизбежно включающей в себя наблюдения в районах водозаборов и на участках локальных загрязнений, имеют целью охарактеризовать динамику во времени: а) естественного фона, который может быть непостоянным; б) развития регионального уровня загрязнений (ниже ПДК); в) масштабов развития аномально высоких загрязнений в районах отдельных очагов загрязнений (выше ПДК). Все это позволяет определить стратегию природоохранных мероприятий в регионе, прогнозировать уровень снижения качества подземных вод во времени, учитывать данное явление при составлении планов рационального освоения подземных вод.

Гидрохимические исследования в региональном плане должны быть главным образом сосредоточены на грунтовых водах, так как основные антропогенные загрязнения проявляются прежде всего в них и лишь затем в напорных. Сроки опробования здесь имеют сезонный характер. В тех случаях, когда опробование проводится по специальным наблюдательным скважинам, отбор проб на анализ проводится лишь после прокачки скважины с отбором не менее двух-трех объемов столба воды в скважине. Исключение могут составить лишь случаи изучения развития загрязнений с четко выраженным отличием по плотности. В этом случае на первом этапе проводится отбор проб в верхней и нижней зоне, либо поинтервально вдоль ствола скважины, а затем проводится прокачка для отбора проб на общий химический состав и другие виды загрязнений.

Аналогичным образом, когда водоносный горизонт неоднороден по фильтрационным свойствам или имеет большую мощность, отбор проб воды на анализ необходимо проводить без прокачки по зонам — на уровне наиболее проницаемых слоев, так как соленые и загрязненные воды проявят прежде всего себя в слоях с более высокими коэффициентами фильтрации. Другими словами, внедрение соленых и загрязненных вод может

происходить отдельными "языками" и уловить их при неоднородном строении горизонта можно лишь опробованием горизонта по зонам. После этого необходимо произвести также прокачку и отобрать еще одну пробу для определения концентрации смешения подземных вод из разных прослоев.

Плотность региональных опробований должна быть увязана с техногенной нагрузкой, определяемой обобщенным показателем или модулем техногенной нагрузки [10], под которым понимается количество выбрасываемых в год загрязняющих веществ, отнесенных к единице площади.

Наблюдения за изменениями концентраций смешения подземных вод разных водоносных горизонтов так же, как и за концентрациями смешения вод разных температур, позволяют решить ряд практически и теоретически важных вопросов, часть из которых была нами перечислена при рассмотрении особенностей наблюдений за режимом температур. Методы решения этих вопросов принципиально одинаковы. Во всех формулах в этом случае вместо данных по температуре должны быть подставлены значения концентраций вод. Под концентрацией при этом может приниматься сухой остаток или общая минерализация воды либо концентрация отдельных расчетных, прежде всего консервативных компонентов (Cl, SO, содержание отдельных изотопов, например He и др.).

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Наблюдения за режимом подземных вод в связи с их эксплуатацией не могут производиться в отрыве от наблюдений за окружающей средой. Изменения, происходящие в окружающей среде, приводят к изменениям в подземных водах, и наоборот. Например, распашка, перепланировка или застройка территорий, зарегулирование поверхностного стока, вырубка лесов, создание на поверхности замли очагов загрязнения могут существенно повлиять на водный и солевой балансы подземных вод. Интенсивная эксплуатация подземных вод может привести к снижению речного стока, вызвать просадки земной поверхности, активизировать карстово-суффозионные процессы, привести к угнетанию растительности, осушению болот, прудов и т. д. Не учитывать всего этого нельзя, так как изменения в среде являются факторами, определяющими особенности режима подземных вод, которые необходимо прогнозировать, а размер негативных последствий водоотбора является одним из основных критериев оптимизации его режима. В тех случаях, когда наблюдения за перечисленными выше элементами среды проводятся соответствующими, ответственными за них, ведомствами, в задачу гидрогеолога входит анализ данных этих наблюдений и установление необходимых для прогнозов закономерностей и количественных связей. Однако часто это не входит в планы соответствующих ведомств. Тогда наблюдения проводятся силами гидрогеологических организаций или по их заказу другими организациями.

Одним из наиболее распространенных видов наблюдений за средой являются гидрологические наблюдения. Для изучения условий восполнения запасов подземных вод и одновременной оценки изменений речного

стока исследуются расходы рек и качество их вод на входе в зону влияния водозабора и на выходе из нее. На прилежащем к водозабору участке реки проводятся наблюдения за режимом уровня воды в реке и изменениями профиля дна (на мелких реках). Замеры уровней и расходов рек проводятся в те же сроки, что и уровней подземных вод, а профилей дна — раз в один-два года. В зоне влияния водозабора периодически раз в год проводятся обследования за состоянием растительности, болот, стариц; осуществляется контроль за соблюдением рекомендаций по ограничениям ведения хозяйства в установленных зонах санитарной охраны. В районах водозаборов, расположенных на урбанизированных территориях и в промышленных зонах, важно исследовать загрязненность почв, для чего минимум раз в год следует проводить анализ состава почвенной влаги. В районах, сложенных подверженным просадочным явлениям отложениями, в зонах действующих ключевых водозаборов проводится периодическая прецизионная невелировка местности на первых этапах эксплуатации раз в три—пять лет, а затем с интенсификацией процесса проседания — ежегодно. Измерение величин просадок земной поверхности на участках наблюдательных точек осуществляется не только путем периодического нивелирования устьев скважин при установленных у скважин реперов, но и наблюдениями на самих скважинах. Для этого скважины оборудуются следующим образом (рис. 9).

1. Фильтровая колонна устанавливается в подстилающий эксплуатируемый горизонт, а обсадные труды (или кондуктор) — в верхней части толщи. Для изучения величины оседания земной поверхности измеряют увеличивающуюся во времени разность высот между фильтровой колонной, являющейся жестким репером, и оседающей вместе с поверхностью обсадной трубой (см. рис. 9, *а*).

2. На дно скважины в подстилающий горизонт пласт на тросе устанавливается груз — якорь. Второй конец троса перебрасывается через установленный на поверхности земли у скважины блок с противовесом. Интенсивность просадки определяется по величине опускания противовеса (см. рис. 9, *б*).

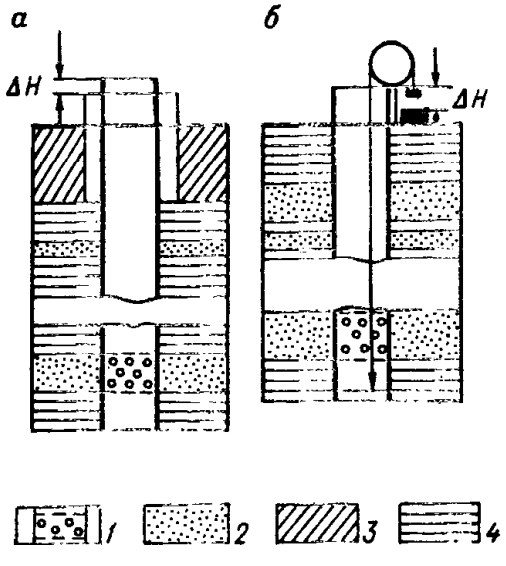


Рис. 9. Схемы оборудования скважин для наблюдений за просадкой (ΔH) земной поверхности:

а — по разности отметок обсадной и фильтровой труб; *б* — по изменениям положения противовеса.
1 — фильтр скважины. Породы: *2* — водонасыщенные, *3* — слабопроницаемые, *4* — водоупорные

В районах возможного перехвата водозабором болотных вод необходимо проводить наблюдения за уровнями и составом воды в болотах. С одной стороны, перехват болотных вод и активизация окислительных процессов на осушаемых болотах могут ухудшить качество эксплуатируемых подземных вод за счет повышения их кислотности, содержания железа, марганца и органики. С другой стороны, болота нередко формируются за счет разгрузки подземных вод, перехват которой и снятие испарения с участков болот могут существенно улучшить условия восполнения запасов подземных вод.

На территориях, где в итоге интенсивной эксплуатации подземных вод возможна активизация карстово-суффозионных процессов, необходимо периодически проводить карстологическую съемку с изучением поверхностных форм карста (появление новых воронок, расширение старых), выявлением возможных факторов, способствующих активизации карста (потери речного стока, потери из водопроводных и канализационных сетей, сброс промстоков, распространение загрязнений — возможных катализаторов карстового процесса и т. д.). Для выявления потенциальных зон активизации карста целесообразно проведение гелиевой съемки с ежегодным отбором проб в аномалиях гелия на тритий и свободную углекислоту. Необходимы наблюдения и за возможными изменениями растительности.

Периодически следует проводить обследования возможных очагов загрязнения подземных вод с оценкой изменчивости во времени модуля техногенной нагрузки, определяющего потенциальную опасность загрязнений подземных вод в зонах влияния интенсивного водоотбора.

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ И ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Помимо наблюдений за динамикой дебита водозаборов, режимом уровня, температуры и качества подземных гидрогеологические режимные партии должны следить за техническим состоянием водозахватных сооружений. Особый интерес представляет изучение процессов коррозии труб и фильтров, явлений механической, физико-химической и биологической кольматации фильтров и водоносных пород вблизи эксплуатационных и наблюдательных скважин, заиление скважин. Явление кольматации также важно изучать в районах инфильтрационных водозаборов и особенно в условиях искусственного восполнения запасов подземных вод, где может появиться как механическая, так и физико-химическая кольматация зоны фильтрации. Механическая кольматация встречается в долинах рек с повышенной мутностью поверхностных вод, в результате чего происходит, с одной стороны, вмывание глинистых и илистых частиц в поры и трещины пород, снижающее их фильтрационные свойства. С другой стороны, со временем может отмечаться увеличение мощности илистых отложений в русло рек, что также ухудшает степень гидравлической связи поверхностных и подземных вод. Физико-химическая кольматация водо-

вмещающих пород заключается в выпадении в осадок гидратов окиси железа, марганца и сульфатов кальция за счет диспергирования и набухания глин в результате ионного обмена, а также за счет попадания в водоносный горизонт пузырьков защемленного воздуха. Биологическая кольматация заключается в зарастании фильтров за счет жизнедеятельности железистых и сульфатредуцирующих бактерий, образовании бактериальной и органической слизи.

В тех случаях, когда наблюдения за этими явлениями не ведутся, при анализе характера снижения уровня подземных вод под влиянием эксплуатации трудно разграничить, в какой мере снижение уровня в эксплуатационной скважине определяется развитием воронки депрессии, а в какой происходит под влиянием увеличения сопротивления фильтра. Наиболее затруднительно это оценить, когда водозабор состоит из единичной скважины и наблюдательные скважины отсутствуют. Так, по многим эксплуатационным скважинам Терско-Кумского артезианского бассейна нередко трудно установить, произошло ли резкое уменьшение дебитов самоизливающих скважин за счет их заиления и образования в них песчаных пробок, зарастания фильтров или за счет естественного снижения дебитов. При отсутствии специальных наблюдений этот вопрос решить нельзя, так как возможно и то и другое явление.

В связи с этим в комплекс гидрогеологических наблюдений в районе водозаборов должны быть включены: а) наблюдения за мутностью и количеством взвешенных частиц в откачиваемых водах; б) периодические измерения глубин наблюдательных и эксплуатационных скважин и оценка в связи с этим степени устойчивости стенок скважин и работы фильтров; в) периодическое определение гидравлического сопротивления фильтров; г) оценка степени изоляции эксплуатируемого водоносного горизонта от смежных с ним горизонтов.

В тех случаях, когда наблюдается пескование скважин и заиление фильтров, измерения глубин скважин должны производиться ежемесячно. Если пескование и заиление отсутствуют, промеры глубин можно делать реже — раз в полгода, раз в год.

Определить гидравлическое сопротивление фильтра можно тремя способами.

1. При наличии наблюдательных скважин, предварительно определив по ним гидрогеологические параметры, рассчитывается понижение уровня в центральной эксплуатационной скважине (по Дюпюи). Разность расчетного и фактического наблюдаемого понижений будет косвенно характеризовать гидравлическое сопротивление фильтра. Если при периодических определениях гидравлического сопротивления эта разность будет все время возрастать, значит происходит или зарастание фильтра, или кольматация пород в прифильтровой зоне.

2. При отсутствии наблюдательных скважин оценка гидравлического сопротивления фильтра может быть произведена путем кратковременной откачки и наблюдений за восстановлением уровня или путем экспресс-налива некоторого объема воды Q_c (два-три ведра) в испытываемую скважину и наблюдениями за скоростью растекания воды из нее. Измеряя

скорость восстановления или снижения уровня (при экспресс-наливе) на первом этапе при небольших значениях t, скачок ΔH_c в совершенных скважинах может быть ориентировочно определен по формуле В.И. Шестакова

$$\Delta H_c = \frac{w_c v}{km},$$

где w_c — площадь сечения скважины; v — скорость изменения уровня к ней; km — водопроводимость пласта.

Для несовершенных скважин "скачок" может быть определен по формуле

$$\Delta H_н = \frac{w_c v}{kl},$$

где l — длина части скважины, вскрывшей водоносный горизонт.

3. В тех случаях, когда параметры пласта неизвестны, сопротивление фильтра несовершенных скважин можно оценить путем определения инерционности скважины α_c. Для этого в скважину также заливается какой-то объем воды и по наблюдениям за восстановлением уровня строится график $\lg\frac{H_c^0}{H_c} = f(t)$, где H_c — превышение уровня в скважине за время t над статическим уровнем H_c^0, т. е. до налива. Опытные точки на этом графике ложатся на прямую. Коэффициент инерционности определяется по формуле

$$\alpha_c = 0{,}435\ (t/\lg\frac{H_c^0}{H_c}).$$

Для самоизливающих несовершенных скважин α_c определяется путем опытных выпусков с замером дебита Q_c и понижения S_c

$$\alpha_c = \frac{w_c - S_c}{Q_c}.$$

С целью получения характеристики сопротивления фильтра аналогичное опробование следует производить на каждой наблюдательной скважине при ее сооружении. Эта характеристика в процессе эксплуатации водозабора должна периодически проверяться, на основании проверок могут быть установлены все изменения в прифильтровой зоне, связанные с коррозией и зарастанием фильтров, а также с кольматацией пор пород водоносного горизонта. Размеры налива Q_c при этом каждый раз должны быть одинаковыми. В результате таких наблюдений возможно своевременно ставить вопрос о необходимости реконструкции водозабора, чистке и

оживлении скважин. Каждая наблюдательная и эксплуатационная скважина также периодически обследуются с точки зрения технического состояния обсадных труб и оценки возможной их коррозии. Коррозия труб приводит к смешению вод различных водоносных горизонтов. В результате этого в скважине устанавливается какой-то средний уровень подземных вод, отличный как от уровней наблюдаемых, так и связанных с ним водоносных горизонтов, что затрудняет интерпретацию данных наблюдений за режимом уровня в таких скважинах. Корродированные трубы создают условия для загрязнений эксплуатируемого водоносного горизонта, поэтому своевременно обнаружить это явление очень важно.

Сквозные отверстия и течь подземных вод через них в скважину устанавливаются разными путями: а) с помощью нагнетания воздуха по зонам между двумя тампонами и определения при этом утечки воздуха, если имеются корродированные участки; б) путем опускания в скважину фонарей; в) путем проверки утечек по данным химического и бактериологического анализов вод, если смешиваемые воды отличаются по качеству; г) фотографированием стенок скважин специальным фотоаппаратом; д) определением на слух, если фильтрация через образовавшиеся отверстия в трубах слышна в виде плеска воды; е) с помощью осмотра обсадных труб специальной телевизионной аппаратурой.

Для изучения обрушения стенок необсаженных скважин, обрыва колонн обсадных труб, их коррозии, зарастания фильтров и других нарушений технического состояния наблюдательных скважин используются разные геофизические средства диагностики. Одним из таких средств служит электронно-каротажная самоходная установка СКВ-69.

Сложнее определить затрубную фильтрацию и появление взаимодействия водоносных горизонтов по затрубному пространству. В этом случае могут быть применены главным образом специальные геофизические методы ее обнаружения, а также гидрохимические наблюдения за концентрацией смешения подземных вод различных водоносных горизонтов.

Можно использовать опробование скважин на изотопный состав вод. Резкое отклонение изотопного состава вод от характерного для данных глубин водоносного горизонта будет свидетельствовать о затрубной фильтрации. Для таких условий могут быть использованы тритий, гелий и другие природные изотопы.

Косвенным показателем ухудшения технического состояния наблюдательных скважин может служить снижение реакции горизонта на аналогичные с ранее наблюдавшимися воздействиями на подземные воды серии основных режимообразующих факторов. В частности, решение такой задачи может осуществляться путем периодического определения барометрической эффективности водоносного горизонта и построения графика изменчивости этого параметра во времени. Только проведение комплексных исследований даст возможность разграничить влияние искусственных и естественных факторов на режим подземных вод и определить вклад технического состояния скважин в наблюдаемых характеристиках режима подземных вод.

ОБОРУДОВАНИЕ СКВАЖИН И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПРИБОРАМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Оборудование наблюдательных скважин для изучения режима подземных вод в районах водозаборов ничем не отличается от оборудования скважин, предназначенных для каких-либо других целей, и в связи с этим останавливаться на этом вопросе нецелесообразно. Рассмотрим здесь в основном вопросы оборудования эксплуатационных скважин, а также основные требования к приборам для производства наблюдений.

На рис. 10 показаны схемы оборудования эксплуатационных скважин. На первой схеме (см. рис. 10, *а*) водоподъемные трубы совмещены с обсадными, что возможно при сифонном водоотборе. Скважина в таких случаях наглухо закрыта. Производство замеров в этих скважинах возможно лишь через специально просверленные отверстия в колене, завинчивающиеся пробкой. Закрывая вентиль, скважину отключают от общей сети на время замера уровня.

На рис. 10, *б* показан случай, когда водоподъемные трубы не связаны с обсадными. Между водоподъемными и обсадными трубами имеется зазор, через который могут выполняться замеры. В зависимости от величины зазора замеры производятся либо хлопушкой, либо электроуровнемером, толщина штыря которого не превышает 1—1,5 см. Если зазор слишком мал, то высверливаются специальные или используются имею-

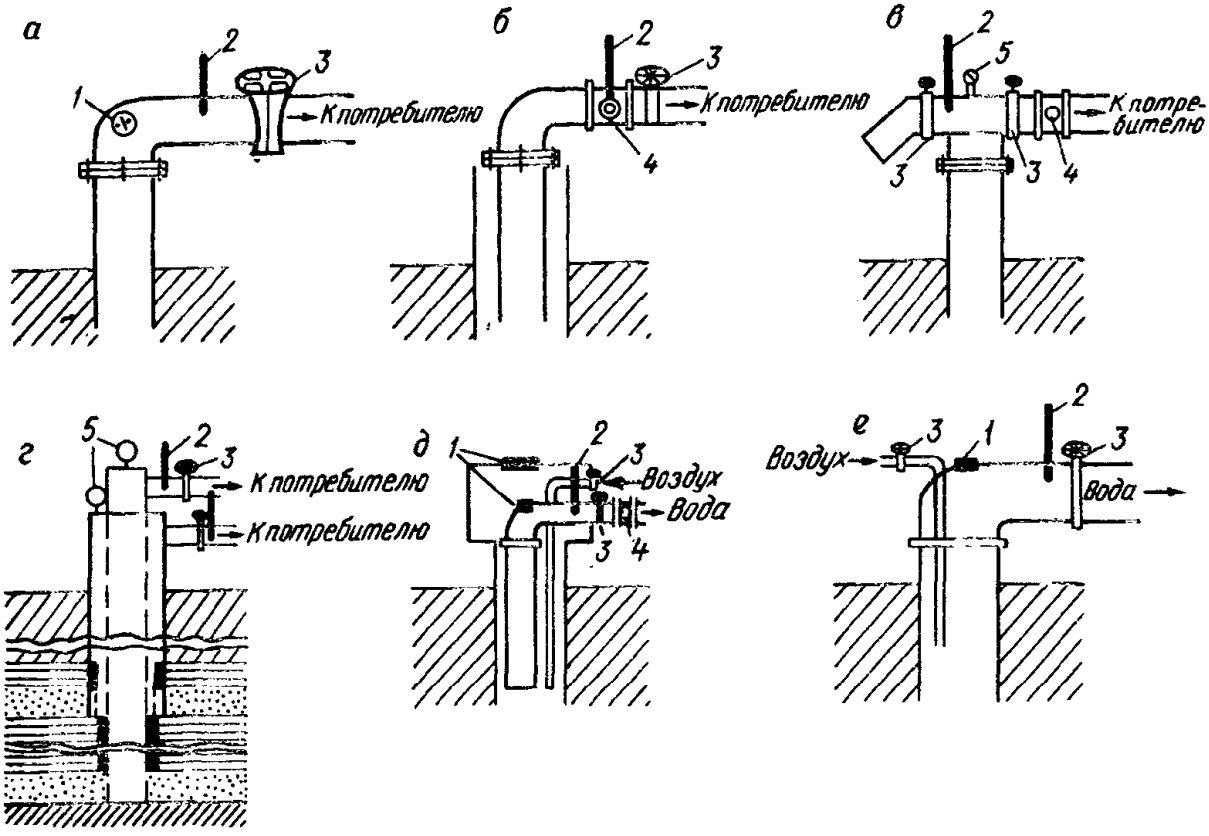


Рис. 10. Схемы оборудования эксплуатационных скважин для наблюдений за режимом подземных вод.

1 — пробка; *2* — термометр; *3* — вентиль; *4* — водомер; *5* — монометр

имеющиеся отверстия во фланцах водоподъемных труб и через них пропускается провод или небольшой электроуровнемер.

На рис. 10, *в* показано оборудование самоизливающей скважины. Для замера уровня перекрываются два вентиля, и отсчет производится по манометру, для замера дебита перекрывается правый вентиль и открывается левый — на выпуск. Нередко в гидрогеологических партиях можно встретить такое оборудование самоизливающих скважин. Скважина основное время работает при постоянном понижении. Замерный кран располагается ниже или выше уровня отвода воды на величину ΔS. Дебиты при этом со временем стабилизируются или стремятся к стабилизации по определенному закону. Во время же замера, перекрывая вентиль (задвижку), наблюдатель соответственно увеличивает (или уменьшает) понижение на ΔS. Так как замер производится сравнительно быстро (несколько минут), каждый раз наблюдается неустановившийся режим фильтрации при уровне откачки, отличном от реального, т. е. эксплуатационного, на ΔS. Такие замеры не могут в полной мере отражать особенности режима эксплуатируемого водоносного горизонта. Замер уровня должен производиться на том же уровне, что и во время эксплуатации (как показано на рис. 10, *в*). При отсутствии манометров замеры уровней в самоизливающих скважинах производятся путем наращивания труб. Отбор проб на химический анаяиз и измерение температур воды из эксплуатационных скважин производятся только на поверхности земли (на изливе).

На рис. 10, *г* показана схема оборудования самоизливающей скважины сразу на два водоносных горизонта. Замеры уровня и расхода производятся отдельно. Расход самоизливающих скважин определяется по скорости заполнения любой емкости или путем установления расходомеров в трубах.

На схемах *д* и *е* показано оборудование эксплуатационных скважин, оснащенных эрлифтами для случаев, когда водоподъемные трубы не связаны с обсадными (см. рис. 10, *д*) и когда обсадные трубы служат одновременно водоподъемными (см. рис. 10, *е*).

Если между водоподъемными и воздушными трубами нет зазора, замеры уровней можно производить лишь через специальное отверстие, завинчивающееся пробкой. Для производства замера необходимо перекрывать воздушные трубы. Открывать пробку можно, лишь соблюдая осторожность, выждав некоторое время, так как под давлением газовой смеси она может вылететь с большой силой. Водоподъемные трубы при этом перекрываются, чтобы предотвратить возврат воды из резервуара в скважину.

Требования, предъявляемые к приборам для производства наблюдений за режимом подземных вод, определяются отмеченными выше особенностями режима подземных вод и режима их эксплуатации. Так, в центре водозабора, где режим наиболее динамичен, наблюдательные скважины по возможности должны быть оборудованы самописцами уровней. На неохраняемых территориях последние устанавливаются в охранные будки. На периферии воронки депрессии и при стабильном водоотборе и обеспеченном восполнении запасов подземных вод наблюдения могут

Таблица 1. **Самопишущие приборы для определения уровней воды в гидрогеологических скважинах**

Марка прибора	Средство защиты	Принцип действия	Способ регистрации	Периодичность регистрации	Продолжительность работы без надзора	Диаметр наблюдательной скважины, мм
"Валдай"	Будка	Поплавковый	Графическая запись	Непрерывная	12 ч	>250
ГР-38	"	"	То же	"	1 мес	>250
СУВ-3	Кожух или будка	"	"	"	7 сут	>89
ГГП-20	Обсадная труба	Электроконтактовый	Цифроеой отпечаток	Через 12 или 1 ч	2 мес (через 12 ч) или 10 сут (через 1 ч)	>89
АСУ-1	То же	Поплавковый	То же	Через 24 или 2 ч	6 мес (через 24 ч) или 15 сут (через 2 ч)	>89
РУЦ-2	"	"	"	Через 12 или 11 ч	10 мес (через 12 ч) или 60 сут (через 1 ч)	>89

осуществляться переносными измерительными приборами. Наблюдения за режимом температур (при ярусном опробовании по всему стволу скважин) проводятся "косами" термисторов, установленных в скважинах для исключения нарушения в них температурного поля, что може произойти при опускании в нее косы или измерительного прибора.

Для автоматизированного измерения уровней используются следующие самописцы уровней (табл. 1).

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СВЯЗИ С ИХ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ

Воздействие хозяйственной деятельности на среду во многих районах столь значительно, что может вызвать и необратимые негативные процессы в ней. Особенно опасно загрязнение среды, появление которого возможно практически повсеместно, например, в результате неожиданных прорывов шламохранилищ, накопителей промстоков, промышленных и транспортных аварий, плохо организованного хранения химического сырья, отходов производства и т. д. Все это поставило на повестку дня во многих странах создание оперативной системы целенаправленного сбора информации об окружающей среде, получившей международное название мониторинга. Оперативность сбора данных в целях принятия по ним решений по предотвращению негативных последствий необходима далеко не всегда. Она важна при слежении за рядом быстро протекающих природных процессов, способных причинить ущерб народному хозяйству, в пер-

вую очередь таких, как катастрофические паводки, сели, землетрясения, оползни, ураганы. Мониторинг в широком смысле предусматривает организацию наблюдений за всеми элементами среды — атмосферой, гидросферой, биосферой и литосферой. Создается даже глобальная система мониторинга окружающей среды (ГСМОС). Особенностью мониторинга по сравнению с существующими в настоящем наблюдениями является оперативность сбора данных для своевременного принятия соответствующих решений. Поэтому под мониторингом обычно понимается автоматизированный сбор, передача и обработка информации о природной среде в целях оперативного прогноза и управления. Это новый уровень информационной системы целенаправленных наблюдений, необходимых для прогноза как природных, так и прежде всего антропогенных воздействий на среду. В этой связи мониторинг состояния подземные вод также необходим и как в плане своевременного анализа и прогноза происходящих в них природных изменений (т. е. как элемента окружающей среды в целом), так и в плане анализа и прогноза возможных антропогенных воздействий на подземные воды. Если рассматривать подземные воды как часть окружающей среды, очевидно, что мониторинг состояния подземных вод (МПВ) не может создаваться самостоятельно без увязки с ГСМОС и прежде всего мониторингом гидрометеорологических данных. Именно поэтому в ряде стран система мониторинга организована или создается единой для гидрологических и гидрогеологических данных в пределах определенных водосборных бассейнов (по отдельным бассейнам рек). Информация о режиме атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод, а также водоотбора в пределах выбранного бассейна фиксируется автоматически с заданными интервалами времени, автоматически передается на станцию по проводам, радио (на УКВ) или лазером через спутник связи. На станции она вводится в память вычислительной машины (в банк или базу данных) для хранения информации и одновременно вводится в составленную с учетом взаимодействия поверхностных и подземных вод постоянно действующую математическую модель водных ресурсов бассейна. На этой модели составляются прогнозы поведения уровней и расходов поверхностных и подземных вод, изменения их качества, на основе которых проигрываются варианты оптимального использования водных ресурсов в пределах бассейна или меры по управлению этими ресурсами (регулированием поверхностного стока, ограничению или интенсификации искусственного восполнения подземных вод, определению оптимального режима водоотбора и т. д.). Введение подобной системы мониторинга в действие требует, с одной стороны, определенных структурных или организационных решений, позволяющих или сосредоточить в одних руках сбор, анализ и управление поверхностными и подземными водами, или четко скоординировать все эти элементы. С другой стороны, это требует разработки и создания технического обеспечения решения проблемы. Эта задача сложная и потребует многих лет подготовительных работ. Следует отметить, что в США такая задача была поставлена в 1957 г., а реализована лишь через 20 лет, да и то по ограниченной части сети [46]. Аналогичным образом создается мониторинг в Австралии и ряде других

стран. Техническая сторона проблемы МПВ связана с разработкой серий селективных электродов на различные ингредиенты состава природных вод и наиболее распространенных в них загрязнений, а также в создании скоммутированной системы приборов по измерению, регистрации и передаче на расстояние информации о подземных водах и ввод ее в ЭВМ.

Гидрогеологическая сторона проблемы МПВ связана с обоснованием состава и частоты наблюдений, требований к регистрирующим приборам (по возможным амплитудам колебаний, измеряемых характеристик, требуемой точности измерений, условий работы приборов), созданием необходимой наблюдательной сети для МПВ, разработкой методов и программ анализа режима подземных вод в региональных масштабах, методов прогнозирования режима подземных вод в естественных и нарушенных условиях для различных периодов по заблаговременности, созданием постоянно действующих моделей бассейнов, разработкой методов и программ по управлению режимом подземных вод.

Отсутствие необходимой технической оснащенности не должно служить основанием для отказа от развертывания работ по МПВ, которые должны начаться именно с гидрогеологических ее аспектов.

На первом этапе МПВ следует создать на ряде ключевых опорных водозаборов в сложных гидрогеологических и гидрохимических условиях, где постоянный и оперативный контроль особенно важен. Такие условия встречаются, например, в районах, где водозаборы работают вблизи контуров некондиционных природных или загрязненных вод, на грани истощения или обеспечиваются главным образом искусственным восполнением запасов подземных вод. Систематический контроль за режимом подземных вод в таких случаях позволит своевременно получить информацию о возможной угрозе истощения или загрязнения подземных вод и своевременно принять меры по предотвращению этой угрозы (включение барражных водозаборов, перехватывающих поток загрязненных вод, усиление отбора соленых вод при эксплуатации линз пресных или подземных вод на морских побережьях, усиление искусственного восполнения при истощении подземных вод и др.). Эти участки требуют максимальной автоматизации исследований, т. е. максимального соответствия требованиям МПВ.

На втором этапе в МПВ может быть включена контрольная наблюдательная сеть, оставшаяся часть опорной ключевой сети и региональная опорная сеть. Данные наблюдений, даже если сбор информации здесь и не будет автоматизированным, смогут быстро быть использованы для региональных обобщений о состоянии подземных вод — изменчивости их ресурсов по годам и сезонам года, качестве подземных вод, масштабах развития загрязнений, а также для составления прогнозов режима подземных вод в целях управления.

Наблюдательная сеть на объектах, включенных в МПВ, должна соответствовать изложенным выше требованиям к ней в наиболее полном объеме. Сроки производства наблюдений по сети МПВ должны быть увязаны со сроками наблюдений за другими компонентами окружающей среды (атмосферой, почвой, поверхностными водами, геодинамическими

процессами), т. е. должны быть сопоставимы с ними. Программа наблюдений в зависимости от региональных, климатических, гидрогеологических и антропогенных условий может в процессе исследований меняться как в сторону расширения (например, включение в состав наблюдений новых видов загрязнений), так и в сторону сокращения — исключение из состава наблюдений компонентов, концентрации которых в подземных водах несущественны.

Глава 4
МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТАХ И РЕГИОНАЛЬНЫХ ОЦЕНКАХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

На поисково-разведочных стадиях гидрогеологических исследований и при региональных оценках запасов подземных вод одной из основных задач изучения режима подземных вод служит определение возможной сезонной и многолетней изменчивости естественного питания и мощностей водоносного горизонта. Решение этой задачи связано как собственно с изучением и анализом закономерностей естественного режима подземных вод, так и с получением часто недостающей для такого анализа необходимой исходной информации.

Другая задача связана с использованием данных наблюдений за режимом подземных вод для определения основных расчетных гидрогеологических параметров и прогнозом возможной изменчивости восполнения запасов подземных вод в процессе эксплуатации.

УЧЕТ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОЩНОСТЕЙ И ПИТАНИЯ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА

Значение изучения естественного режима подземных вод для определения расчетной мощности водоносного горизонта в различных гидрогеологических условиях неодинаково. Особенно оно важно, когда амплитуды колебаний уровней подземных вод соизмеримы с мощностью водоносного горизонта или составляют существенную часть от нее. Для того чтобы оценить значение и необходимость учета естественных колебаний уровня подземных вод, не всегда требуется проводить длительные наблюдения. В большинстве случаев это можно сделать, руководствуясь установленными, достаточно четкими, региональными закономерностями режима подземных вод по фондовым и опубликованным материалам.

Наиболее существенны сезонные и многолетние колебания (в сопоставлении с мощностью горизонта) в трещинно-карстовых отложениях и в аллювиальных отложениях малой мощности, особенно в долинах с прерывающимся поверхностным стоком. Так, сезонные колебания уровней карстового водоносного горизонта в районе Силурийского плато достигают 10—29 м. Дебиты карстовых источников, широко использующихся для водоснабжения, особенно в зонах развития открытого карста средиземноморского типа, в годы высокой водности возрастают в 30—600 раз по

Таблица 2. **Амплитуды многолетних колебаний уровней подземных вод**

Гидрогеологическая режимная партия	Номер скважины	Литология водовмещающих пород	Средняя глубина до воды, м	Начало наблюдений, год	Амплитуды колебаний уровней, м		
					по суточным замерам	по среднемесячным значениям	по среднегодовым значениям
Южно-Якутская	26	Песчаники, угли	83,7	1962	80,95	62,01	15,81
Воркутинская	887	Пески, песчаники	12,7	1965	19,57	18,74	12,30
Северо-Западная	1/3—3	Известняки	14,3	1951	10,3	9,54	4,62
Латаийская	17	Супеси	1,8	1959	4,6	3,32	1,44
Белорусская	151	Пески	2,5	1947	3,92	3,37	1,56
Горьковская	2	Известняки	20,5	1950	4,91	2,28	1,30
ЦЧО	Шурф 1	Суглинки	6,1	1917	5,95	5,67	3,15
КМА	55г/727	Пески	39,0	1958	7,27	7,20	6,15
Северо-Украинская	9-103	Суглинки	3,0	1959	5,17	4,53	3,66
Львовская	14	Галечник	2,4	1953	5,3	4,73	1,11
Южно-Украинская	35	Пески	2,2	1953	2,6	1,96	1,13
Крымская-Степная	373	Супеси	15,5	1954	5,79	5,63	2,68

сравнению с их минимальными за многолетие расходами. Порядок возможных многолетних амплитуд колебаний уровней подземных вод в различных гидрогеологических и климатических условиях можно иллюстрировать табл. 2.

Как видно из табл. 2, многолетние колебания уровней подземных вод, оцененные по суточным замерам, могут в три—пять раз превышать внутригодовые колебания уровней подземных вод. Разница же между многолетними амплитудами, рассчитанными по суточным и среднемесячным значениям, не столь существенны. Это позволяет использовать последние для анализа и прогнозов их многолетней изменчивости. Размеры сезонных и многолетних колебаний уровней, а следовательно, и восполнение запасов подземных вод зависят от следующих основных факторов: а) литологического состава пород зоны аэрации и прежде всего от коэффициента фильтрации и недостатка насыщения пород k/μ_n, определяющих скорость инфильтрации и емкость заполняемой в процессе питания части водоносного горизонта; б) граничных условий пласта и его уровнепроводности,

определяющих скорости перераспределения давления в пределах горизонта от областей или зон его питания; в) глубин залегания подземных вод, определяющих расходование части инфильтрующейся в зону аэрации влаги на испарение и ее насыщение до максимально-молекулярной влагоемкости и выше; г) климатической зоны, определяющей интенсивность питания подземных вод атмосферными осадками и их расходовании на испарение.

Определенную роль в восполнении запасов играют расчлененность рельефа, микрорельеф, характер залесенности и другие факторы [21, 22].

В инструкции ГКЗ [15] подчеркивается особое значение изучения естественного режима подземных вод на месторождениях грунтовых и неглубоко залегающих напорных вод, режим которых тесно связан с метеорологическими и гидрологическими факторами. При этом ставится задача определения минимальных, средних и максимальных мощностей водоносных горизонтов, а при исследовании уровенного режима поверхностного стока — минимальных и максимальных его значений 5- и 95 %-ной обеспеченности и соответствующих им значений уровней подземных вод или минимальных средних за 30-суточный период расходов года 95%-ной обеспеченности. При оценке запасов подземных вод по родникам требуется определить минимальный среднесуточный их дебит для года 95%-ной обеспеченности (если эксплуатация предполагается путем прямого каптирования родников), или средний расход этих родников для года 95%-ной обеспеченности (если предусматривается режим водоотбора, соответствующий режиму изменчивости родникового стока по сезонам года). Для небольших городов и сельского водоснабжения допускается снижение расчетной обеспеченности до 90 %. В соответствии с этими требованиями по многолетним рядам наблюдений составляется выборка из минимальных годовых значений уровней или расходов за каждый год из среднегодовых значений или из средних за минимальный 30-дневный период в каждом году. Выбранные минимальные значения должны быть фазово-однородными, т. е. приуроченными к одному периоду года, например только к зимней или только к летней межени.

Полученный хронологический ряд выбранных значений ранжируется, т. е. перестраивается в порядке убывания и для каждого значения определяется его обеспеченность по формуле

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100\ \%, \qquad (4.1)$$

где m — порядковый номер члена в ранжированном ряду; n — общее количество членов ряда.

По полученным значениям обеспеченности P строятся графики $H = f(P)$, $\Delta H = f(P)$ или $Q = f(P)$, на которых разброс эмпирических значений усредняется плавной кривой (рис. 11). При коротких рядах (менее 20 лет) наблюдений крайние на кривой точки в основном будут находиться на значениях > 5 и < 95 %, а поэтому для определения искомого значения уровней, амплитуд или дебитов родников 95%-ной обеспеченности потребуется экстраполяция эмпирической кривой до этих значений.

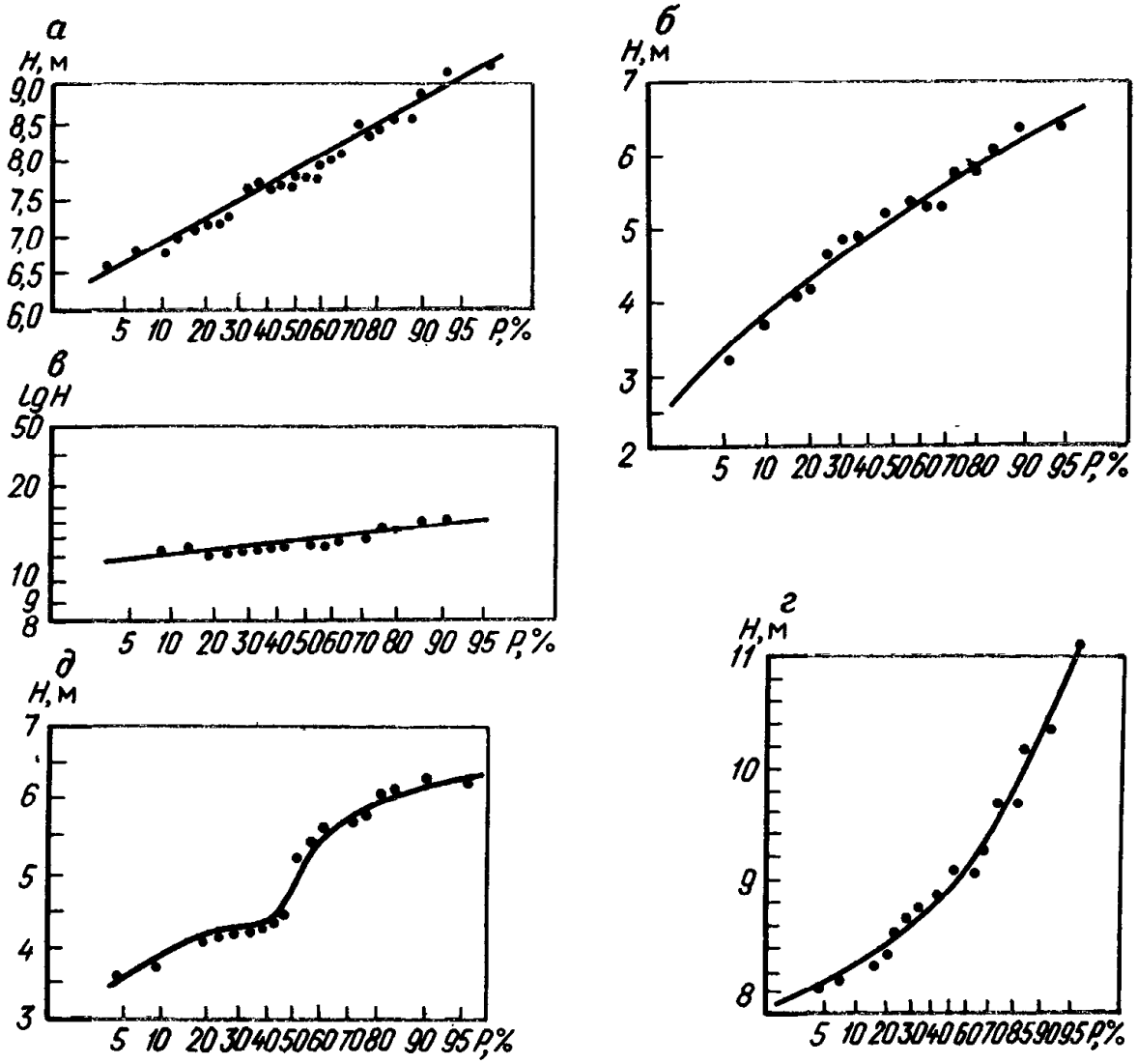


Рис. 11. Типичные графики обеспеченности глубин залегания уровней подземных вод

Учитывая то, что в пределах наблюдаемого ряда могут случайно оказаться значения исключительно редкие по повторяемости (< 1 и > 99 %), точки на концах кривых могут сильно отклоняться от усредняющей кривой, что вносит неопределенность в графическую экстраполяцию таких кривых. Поэтому в этих случаях искомые значения расчетных параметров лучше рассчитывать. Построение теоретической кривой обеспеченности осуществляется по формулам:

$$x_p = z_p \sigma + x; \tag{4.2}$$

$$x_p = \bar{x} \phi (P), \tag{4.3}$$

где x_p — расчетное значение уровня или дебита грунтовых вод заданной обеспеченности P; z_p — табличное значение нормированных отклонений уровней или дебитов от их средних для различных вероятностей функции распределения P, рассчитанных по С.И. Рыбкину [11] для различных значений коэффициентов вариации C_V и асимметрии C_s; $\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ — среднеквадратическое отклонение анализируемого ряда значений;

$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{n}$ — среднемноголетнее значение уровня или дебита, полученное из ранжированного ряда; $\phi(P)$ — табличное значение нормированных отклонений уровней или дебитов от их средних, рассчитанных для различных соотношений C_V/C_s (по М.Ф. Менкелю и С.Н. Кризскому).

Значения C_V и C_s могут быть рассчитаны по формулам

$$C_V = \sqrt{\frac{\Sigma\left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1\right)^2}{n-1}};$$

$$C_s = \frac{\sum^{n}(\bar{x}_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \cdot \frac{n}{(n-1)(n-2)}.$$

Учитывая то, что при коротких ($n < 50$) рядах наблюдений ошибка коэффициента асимметрии может оказаться соизмеримой с величиной самого коэффициента, его расчет становится нецелесообразным. В этих случаях обычно задается соотношение $C_s/C_V = 2$ и значения $\phi(P)$ выбирают по табл. 3 с учетом конкретных значений коэффициента вариации. Ошибка в определении $\phi(P)$, вызванная возможными вариациями соотношения C_s/C_V от 1 до 6, во многих случаях невелика и может составить, например, для $P = 95$ % и $C_V < 0{,}5$, лишь 1–5 %. При $C_V > 0{,}6$ ошибка может существенно возрасти. Однако такие значения C_V встречаются довольно редко. В этом случае расчет кривой обеспеченности проводится по таблицам, составленным М.Ф. Менкелем и С.Н. Крицким для различных соотношений C_s/C_V, и выбирается тот вариант, при котором теоретически рассчитанная кривая наилучшим образом совпала с эмпирическими точками.

Кривые обеспеченности обычно заканчиваются крутым подъемом и спадом. Для облегчения их экстраполяции в область наибольшего практического интереса, т. е. редко повторяющихся значений, используется клетчатка вероятностей, на которой близкие к нормальному закону распределения значения исследуемого ряда ложатся на прямую (см. рис. 11, *а*). Аналогичным образом могут быть спрямлены кривые обеспеченности, подчиняющиеся логарифмически-нормальному закону (см. рис. 11, *б*), если на оси ординат отложить логарифмы значений ряда (уровней и дебитов).

Степень зависимости режима подземных вод от атмосферных осадков или речных вод, инерционности режима, а также влияния на подземные воды различных граничных условий определяет характер кривой обеспеченности. Соответственно различной должна быть и их экстраполяция. Анализ большей части наиболее длинных и сравнительно равномерно распределенных на территории СССР рядов наблюдений за уровнями подземных вод, а также большого (свыше 200) числа рядов подземного стока показали, что их распределение может быть охарактеризовано пятью

Таблица 3. **Ординаты кривых обеспаченности, по С.Н. Крицкому, М.Ф. Менкелю**

$C_s/C_V = 2,0$ (биноминальная кривая)

P, %	Ординаты кривых обеспеченности при C_V										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
1	1,25	1,52	1,83	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,61	5,50
3	1,20	1,41	1,64	1,88	2,13	2,39	2,66	2,94	3,22	3,51	4,05
5	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	3,00	3,45
10	1,13	1,26	1,40	1,53	1,67	1,81	1,94	2,06	2,19	2,30	2,50
20	1,08	1,16	1,24	1,31	1,38	1,44	1,49	1,54	1,58	1,61	1,62
25	1,07	1,13	1,18	1,23	1,28	1,31	1,34	1,37	1,38	1,39	1,34
30	1,05	1,09	1,13	1,17	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20	1,13
40	1,02	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	0,99	0,96	0,92	0,81
50	1,00	0,99	0,97	0,95	0,92	0,83	0,84	0,80	0,75	0,69	0,58
60	0,97	0,94	0,90	0,85	0,80	0,75	0,69	0,63	0,57	0,51	0,40
70	0,95	0,89	0,82	0,76	0,69	0,62	0,55	0,49	0,42	0,36	0,26
75	0,93	0,86	0,78	0,71	0,63	0,56	0,49	0,42	0,35	0,29	0,19
80	0,92	0,83	0,75	0,66	0,57	0,49	0,42	0,35	0,28	0,22	0,13
90	0,87	0,75	0,64	0,53	0,44	0,35	0,27	0,21	0,15	0,11	0,05
95	0,84	0,70	0,56	0,45	0,34	0,25	0,18	0,13	0,08	0,05	0,02
97	0,82	0,66	0,52	0,39	0,29	0,20	0,14	0,09	0,05	0,03	0,01
99	0,78	0,59	0,44	0,31	0,21	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00

типами кривых обеспеченности (см. рис. 11) : 1) эмпирические точки располагаются на вероятностной бумаге (клетчатка Хазена) по прямой линии и близко к прямой, что свидетельствует о нормальном (симметричном) законе распределения;

2) эмпирические точки располагаются в виде выпуклой вверх кривой, характерной для правоасимметричного распределения;

3) эмпирические точки располагаются в виде вогнутой кривой, которая спрямляется на логарифмической вероятностной бумаге, что свидетельствует о логарифмическом законе распределения;

4) точки располагаются в виде вогнутой вниз кривой, характерной для левоасимметричного распределения, хорошо аппроксимируемого трехпараметрическим гамма-распределением по С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю;

5) кривая имеет вогнуто-выпуклую форму, что свидетельствует о сложном характере распределения с неоднородными условиями формирования режима подземных вод в годы высокой и низкой водности.

Чаще всего для уровней подземных вод распространены первый, третий и пятый типы кривых, а для подземного стока — первый, четвертый и пятый (в порядке убывания процента их встречаемости). Некоторые закономерности появления того или иного типа кривых рассмотрены ранее [20, 19]. Наиболее общим типом кривых обеспеченности для подземных вод можно считать пятый. Ниже выполаживание кривой определяется

невозможностью снижения уровней ниже или гидравлической границы (реки, озера, болота), или водоупора. Верхнее же выполаживание кривой определяется или "включением" испарения с подъемом уровня, или увеличением с подъемом уровней оттока подземных вод в сторону дрен, что характерно для междуречных и склоновых участков. Однако одновременное влияние верхней, нижней и боковой границ может проявляться лишь при достаточно больших колебаниях уровня подземных вод или при неглубоком залегании водоносного горизонта малой мощности. В тех случаях, когда сказывается только нижняя или боковая граница, можно наблюдать четвертый тип кривой обеспеченности, если влияние оказывает только верхняя граница — второй. В тех же случаях, когда влияние границ на колебания уровней подземных вод не сказывается, наблюдаются первый и третий типы кривых. Немаловажным здесь является и взаимосвязь режима подземных вод с реками и атмосферными осадками. Для прибрежного вида режима подземных вод, определяемого режимом преимущественно поверхностного водотока, типичным будет характерный для поверхностного стока четвертый тип кривой. Для водоносных горизонтов, тесно связанных с атмосферными осадками, например в лавовых покровах, в открытом карсте при неглубоком залегании грунтовых вод могут быть встречены первый и третий типы кривых.

При коротких рядах наблюдений точность определения средних и каких-либо других расчетных значений может быть невелика, а поэтому, принимая во внимание статистический характер выполняемых оценок, целесообразно определять возможную их погрешность. Такую погрешность или возможный разброс значений H_i от принимаемого в расчет среднего можно определить, рассчитав доверительные интервалы такого разброса. Расчет доверительных интервалов $\pm\ \Delta$ от принятого среднего значения $\bar{H}$ проводится по формулам

$$\Delta = \pm\ t_a \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \qquad (4.4)$$

$$H_i = \bar{H} \pm t_a \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad (4.5)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение; t_a — распределение Стьюдента.

В зависимости от принятой вероятности и длины ряда наблюдений t_a распределение нормированных отклонений определяется по табл. 4. В итоге расчетная характеристика уровня (мощности) водоносного горизонта должна характеризоваться какой-то средней величиной (или заданной обеспеченности 50, 90 и 95%-ной) с поправкой в $\pm\ \Delta$ (суммарный возможный разброс $= 2\Delta$). В итоге запасы подземных вод могут быть рассчитаны в интервале при значениях мощности $\bar{H} + \Delta - \bar{H} - \Delta$. Для достоверного определения и уровней подземных вод заданной обеспеченности и возможной погрешности такой оценки необходим достаточно длинный

Таблица 4. **Распределения нормированных отклонений t_α в зависимости от объема выборки $(n-1)$ и вероятности α**

$n-1$	Распределения t_α при α					
	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
1	1,96	3,08	6,31	12, 71	31,82	63,66
2	1,39	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
3	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
5	1,16	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03
6	1,19	1,44	1,94	2,45	3,14	3,70
7	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
8	1,11	1,40	1,86	2,30	2,90	3,36
9	1,10	1,38	1,83	2,46	2,82	3,25
10	1,09	1,37	1,84	2,23	2,76	3,17
11	1,09	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11
12	1,08	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
13	1,08	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
14	1,08	1,35	1,76	2,14	2,62	2,98
15	1,07	1,34	1,75	2,15	2,60	2,95
17	1,07	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
19	1,07	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
21	1,06	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83
23	1,06	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81
25	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79
27	1,06	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77
30	1,06	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75
∞	1,03	1,28	1,65	1,96	2,33	2

ряд наблюдений за режимом подземных вод. Выяснить, какой должен быть минимум продолжительности наблюдений для того, чтобы сделать такие оценки надежными, трудно. Можно лишь с уверенностью сказать, что чем длиннее ряд наблюдений, тем достоверность расчетов выше, и, наоборот, четкой границы здесь быть не может. Наряду с этим условно порядок необходимой продолжительности наблюдений может быть оценен на основе анализа закономерностей режима подземных вод в многолетнем разрезе. В частности, исследования многолетней цикличности в режиме уровней подземных вод и подземного стока показали, что в подземных водах имеется тенденция к многолетним колебаниям с периодичностью, близкой к 2–3; 5–6 и 10–12-летней. В отдельных случаях отмечена 15- и 19-летняя цикличность [18, 19]. Несмотря на то что установленная цикличность не является четко выраженной и каждый последующий цикл, как правило, не повторяет предыдущий ни по амплитуде, ни по периоду, можно все-таки считать, что на отрезке в 15–19 лет почти гарантированно будут зафиксированы и многолетний минимум, и многолетний максимум или близкие к ним положения уровней и расходов подземных вод. Поэто-

му минимальным сроком наблюдений по таким эмпирическим данным можно считать 15—19 лет, т. е. около 20 лет. Можно также отметить установленную региональную тенденцию в продолжительности циклов в подземных водах [18]. Так, в западных и южных районах страны с более мягким климатом преобладают короткопериодические циклы (2—3 и 5—6-летние), в восточных же районах с более континентальным климатом — более продолжительные циклы (до 12—14 лет), что также может служить критерием для сокращения срока наблюдений в западных и южных районах до 10—12 лет. При отсутствии таких рядов наблюдений требуется их реставрация.

СПОСОБЫ НАРАЩИВАНИЯ КОРОТКИХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО НИМ РАСЧЕТНЫХ МОЩНОСТЕЙ ГОРИЗОНТОВ И АМПЛИТУД КОЛЕБАНИЙ УРОВНЕЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

На участках разведки подземных вод наблюдения за их режимом бывают, как правило, кратковременными (2—3 года) и поэтому почти всегда, когда учет режима имеет существенное значение в определении величины запасов подземных вод, требуется наращивание имеющегося короткого ряда наблюдений и оценка степени водности тех лет, в которые были проведены разведочные работы. Оценить водность лет проведенных разведочных работ можно по рядам-аналогам. Как было показано выше, амплитуды колебаний уровней подземных вод даже в одной климатической зоне и орографической области весьма разнообразны и зависят главным образом от литологического состава водовмещающих пород и строения зоны аэрации, граничных условий пласта в плане и разрезе, а также от глубин залегания подземных вод. Все эти условия необходимо учитывать при обосновании аналогичных участков. Наиболее достоверные представления о характере режима подземных вод на неизученной территории могут быть получены по рядам-аналогам с продолжительными (свыше 10—12 лет) периодами наблюдений, расположенными в сходных гидрогеологических условиях. Доказательство аналогии изученного и неизученного участков должно базироваться на рассмотренном выше районировании территории по условиям формирования режима земных вод. В соответствии с этим районированием изученный и неизученный участки должны быть приурочены к идентичным гидрогеологическим районам, участкам и подучасткам, т. е. к различным видам и разновидностям режима. Учитывая изменчивость климатических воздействий на подземные воды разноудаленных участков, расстояние между изучаемым и изученным участками, как показали исследования Н.Ф. Дементьева, не должны превышать 100 км.

Для доказательства идентичности гидрогеологических условий участков могут быть использованы также данные по модулям подземного стока с них, их положение по отношению к базисам дренирования подземных вод по особенностям внутригодового режима уровней в периоды летнего спада, весеннего и осеннего подъемов уровней. Особую важность в таком сопоставлении режима подземных вод различных участков может

дать их реакция на гидрометеорологические факторы. Для представления этой реакции необходимо иметь минимум шесть-семь месяцев совместных наблюдений в периоды наиболее контрастных колебаний уровней подземных вод или дебитов источников. Еще лучше иметь два-три года совместных наблюдений на изученном и неизученном участках, что позволит изучить эту реакцию в годы различной водности.

Обоснование гидрогеологической аналогии изучаемого участка с коротким рядом наблюдений предусматривает доказательство идентичности законов распределения уровней или расходов подземных вод, что решающим образом определяет точность многолетних характеристик режима по ряду аналогов.

По поведению кривых обеспеченности в области высоких и низких значений обеспеченности (см. рис. 11) нетрудно убедиться в существенности возможных ошибок оценок многолетних характеристик режима подземных вод, если ряд-аналог и экстраполируемый ряд будут иметь различные законы распределения. Если среди возможных рядов-аналогов, выбранных на основе гидрогеологического районирования, имеются различные законы распределения уровней или расходов подземных вод, могут появиться сомнения в гидрогеологической аналогии участков. В этом случае для оценок многолетних характеристик режима подземных вод целесообразно выбрать ряд с таким типом кривой обеспеченности, который создает необходимый инженерный запас в уровнях, глубинах, мощностях или расходах подземных вод.

Для месторождений подземных вод, гидравлически связанных с рекой, где режим уровней подземных вод обусловлен режимом уровней воды в реке, определить водность лет можно по данным гидрологического режима. Для этого строится график обеспеченности уровней или расходов рек, на нем выделяются уровни или расходы последних лет и по графику определяется их водность в процентах обеспеченности. Для инфильтрационных водозаборов, расположенных вблизи реки, где абсолютные отметки уровней подземных и поверхностных вод практически идентичны, с этого же графика снимаются аболютные отметки уровней 5, 50 и 95%-ной обеспеченности, которые и служат исходной отметкой для отсчета от них мощности водоносного горизонта соответственно 5, 50 и 95%-ной обеспеченности. По разности отметок уровней 5 и 95%-ной или 1 и 99%-ной обеспеченности определяется возможная многолетняя амплитуда колебаний уровней подземных вод. Для месторождений подземных вод, не связанных с рекой, наилучшим рядом-аналогом может служить ряд наблюдений за режимом подземных вод по скважине, расположенной в аналогичных гидрогеологических условиях в ближайшем районе, что обеспечит аналогию и в синхронности режима и в законе распределения уровней подземных вод.

Для получения минимальных, максимальных и средних за многолетие значений уровня подземных вод по короткому двух-трехлетнему ряду наблюдений необходимо построить кривую обеспеченности ряда-аналога по среднегодовым значениям уровней (или расходов) подземных вод в координатах $h - P$ (где h — глубина залегания уровня подземных вод в

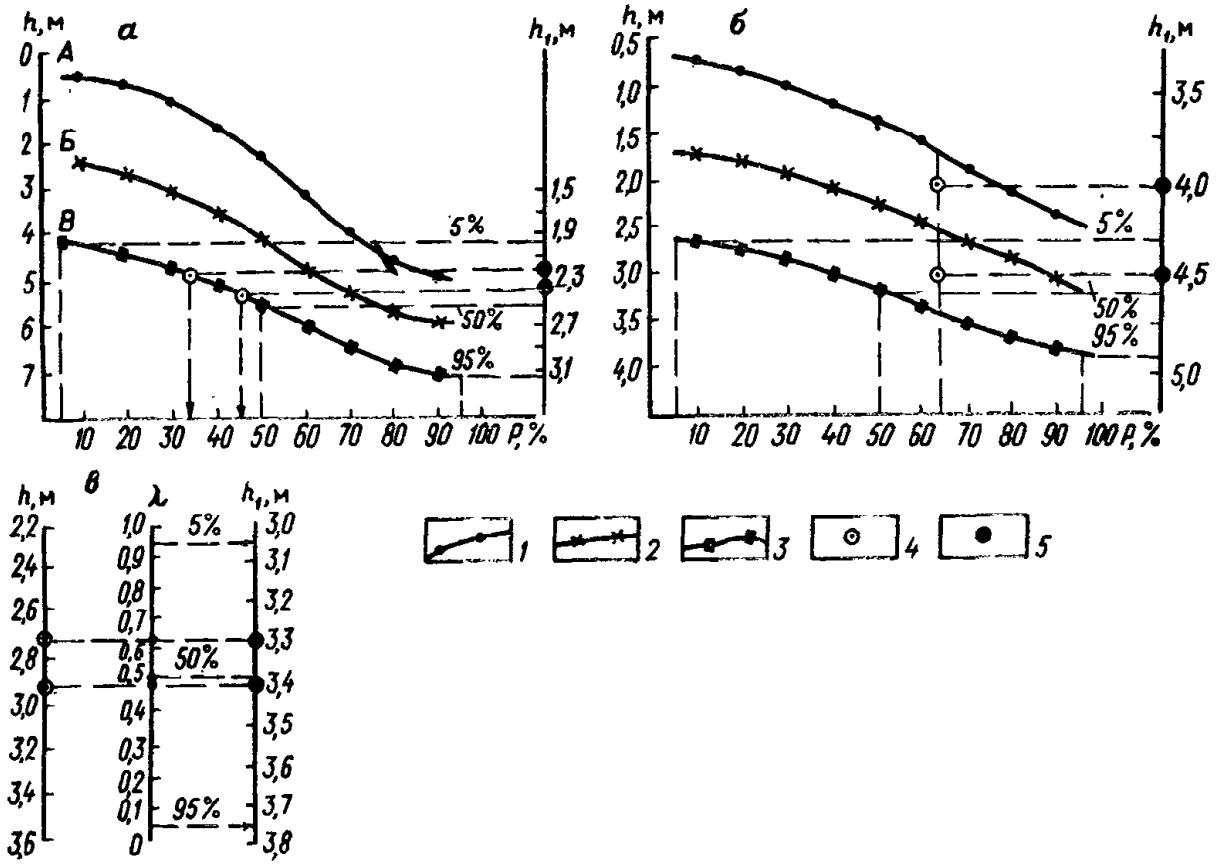


Рис. 12. Схемы определения многолетних характеристик режима подземных вод по коротким рядам наблюдений.

Графики обеспеченности годовых значений уровней по ряду-аналогу: *1* — максимальных, *2* — срдних, *3* — минимальных. Положение уровней на период совместных наблюдений: *4* — в ряде-аналоге, *5* — в коротком ряду

скважине-аналоге в метрах). На кривой выделяют две точки, соответствующие двум годам наблюдений за режимом подземных вод на месторождении (рис. 12, *а*). Опустив перпендикуляры из этих точек на ось *P*, определяют водность соответствующих лет. Затем, проведя горизонтальные линии (из этих же точек) до шкалы глубин залегания уровня подземных вод в скважине с коротким рядом наблюдений h_1, фиксируют на ней значения замеренных уровней (среднегодовых или минимальных годовых, в зависимости от того по каким значениям строилась кривая обеспеченности ряда-аналога). По этим значениям осуществляют разбивку шкалы h_1 в пределах кривой ряда-аналога. Затем, используя кривую обеспеченности и построенную новую шкалу, снимают с графика все необходимые значения. По уровню 50%-ной обеспеченности определяют среднемноголетнее положение уровня (в глубинах от поверхности земли или в абсолютных отметках). По уровню 95%-ной обеспеченности находят соответствующую расчетную мощность горизонта, а по разности уровней 5 и 95%-ной обеспеченности — возможную многолетнюю амплитуду колебаний уровней подземных вод на участке месторождения. Аналогичным способом можно получить дебиты источников или заданной обеспеченности минимальные за многолетие.

Многолетние характеристики режима подземных вод могут быть получены и по совсем коротким, всего три—шесть месяцев, периодам наблюдений. Для этого достаточно зафиксировать изменения уровней (или расходов) подземных вод на достаточно контрастном отрезке их режима, т. е. в период спада или подъема уровней (или расходов). По крайним точкам этого периода для этих же временных моментов находятся соответствующие изменения уровней в ряде-аналоге и их значения откладываются на ординате графика обеспеченности, соответствующей обеспеченности года проводимых наблюдений (см. рис. 12, *б*). Затем эти две точки сносятся на шкалу h_1, где фиксируются отмеченные изменения в уровнях и проводится разбивка шкалы h_1, по которой определяют величины минимальных, максимальных и средних значений уровней или расходов подземных вод заданной обеспеченности, снимая их с кривой обеспеченности ряда аналога и вновь построенной шкалы. Используя данный прием, можно осуществить восстановление графика колебаний уровней или расходов подземных вод за прошлые годы, установив максимальные и минимальные положения уровней подземных вод за каждый год, а по амплитудам годовых колебаний определить изменчивость питания по годам.

При нормальном или близком к нормальному закону распределения уровней или расходов подземных вод процесс приведения коротких рядов наблюдений к многолетним упрощается. В этом случае для приближенных прикидочных оценок можно не строить график обеспеченности по ряду-аналогу, а достаточно определить максимальные и минимальные за многолетние уровни по шкале h. Затем разделить полученную многолетнюю амплитуду на равные интервалы в долях единицы, построить шкалу λ и определить на этой шкале положение двух уровней для ряда-аналога соответственно на начало и конец их спада в период совместных наблюдений (см. рис. 12, *в*). Положение этих уровней сносится на шкалу h_1, где для этих же временных отрезков откладываются отметки или глубины уровней подземных вод анализируемого короткого ряда, которые затем экстраполируются до положений $\lambda = 1$ и $\lambda = 0$. Средние многолетние значения уровней короткого ряда определяются по шкале h_1 при $\lambda = 0{,}5$, а уровни 5 и 95%-ной обеспеченности — условно для $\lambda = 0{,}05$ и $0{,}95$. Условность такой оценки заключается в том, что зафиксированные максимальные и минимальные значения ряда-аналога могут не отражать максимально-возможную амплитуду, а могут сами находиться на уровнях, не достигающих 5 и 95%-ной обеспеченности. Поэтому даже при нормальном законе распределения лучше строить график обеспеченности, экстраполировать его в области высоких и низких значений обеспеченности и по нему выполнять все определения.

При отсутствии данных наблюдений за режимом подземных вод, которые могли бы служить рядом-аналогом для приближенной оценки водности года (как крайний случай), можно использовать наблюдения за атмосферными осадками. Однако при этом следует иметь в виду, что полученные многолетние характеристики режима подземных вод могут оказаться весьма неточными. Это обусловлено тем, что корреляционные связи режима уровней и расходов подземных вод с атмосферными осадками во

многих случаях невысоки. Возникают временные сдвиги между многолетними экстремумами осадков и уровнями подземных вод. Могут не совпадать и законы распределения уровней подземных вод и атмосферных осадков. Поэтому такие сопоставления во многих случаях не способны дать удовлетворительных результатов. В тех случаях, когда связи с атмосферными осадками низки, можно проверить возможность их повышения за счет учета интегрирующей способности подземных вод отражать увлажненность ряда предыдущих лет [18]. Для этого устанавливаются корреляционные связи уровней подземных вод с суммарными осадками двух, трех и т. д. предыдущих лет. С увеличением количества суммируемых осадков за ряд лет корреляционные связи будут расти и при определенном числе лет, соответствующем среднему периоду водообмена водоносного горизонта, достигнут максимума (рис. 13). Для удлинения ряда наблюдений за уровнями подземных вод в этом случае используются корреляционные связи уровней подземных вод с суммой осадков за такой период. Если на участке месторождения подземных вод имеется сравнительно продолжительный (шесть-семь лет), но все-таки еще короткий для получения достоверных многолетних характеристик режима подземных вод, период наблюдений, его можно нарастить. При этом под коротким рядом наблюдений понимается ряд менее 10—11 лет для западных и южных районов страны и менее 15 лет — для районов с континентальным климатом. Для наращивания хронологического ряда наблюдений в таких случаях могут быть использованы различные методы.

1. Метод парной корреляции между уровнями подземных вод в анализируемой скважине с коротким рядом наблюдений и уровнями подземных вод скважины-аналога, располагающейся в сходных гидрогеологических условиях и имеющей длинный ряд наблюдений. Идентичность режима подземных вод по скважинам-аналогам должна быть доказана не только высокими корреляционными связями между их уровнями за период совместных наблюдений, но и идентичностью законов распределения уровней за тот же период. Кроме того, для наращивания могут быть использованы связи с режимом рек или эффективными атмосферными осадками (за холодный период года). Указанные корреляционные связи могут быть установлены графически или аналитически. Составив уравнение регрессии за период совместных наблюдений за режимом подземных вод

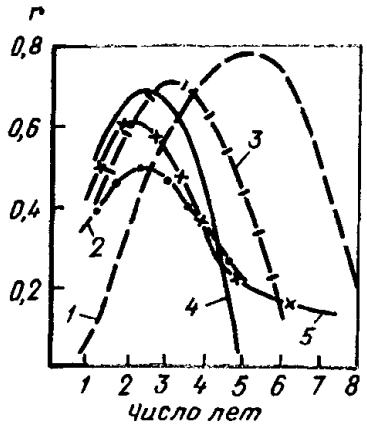


Рис. 13. Графики зависимости тесноты связи (*r*) средне-годовых уровней грунтовых вод от количества суммируемых атмосферных осадков (*2—5*) или разности осадков и испарения (*1*) за ряд лет.

1—3 — графики по скважинам Хабаровского края; *4—5* — графики по скважинам Западной Сибири

и гидрометеофакторами и зная последние за более длительный промежуток времени, можно рассчитать уровни подземных вод в прошлом (т. е. составить палеогноз режима уровней подземных вод за период, когда наблюдений за режимом подземных вод не велось).

Оба эти приема позволяют удлинить хронологические ряды наблюдений, но содержат систематические ошибки, занижающие размах колебаний уровней подземных вод. Связано это с тем, что в расчетном уравнении регрессии каждому значению x_i соответствует несколько значений y, а в расчет принимается лишь $y_{i\text{ср}}$.

Компенсация подобного нивелирования размаха колебаний для первого метода достигается устранением из уравнения регрессии коэффициента корреляции с сохранением его знака. Расчет палеогнозных значений ведется по формуле

$$y_i = \bar{y} \pm \frac{\sigma_x}{\sigma_y}(x_i - \bar{x}), \qquad (4.6)$$

где y_i, $\bar{y}$, σ_y — значение уровней подземных вод наращиваемого короткого ряда, их среднемноголетняя норма и среднеквадратичное отклонение; x_i, $\bar{x}$, σ_x — аналогичные значения параметров длинного ряда наблюдений, используемых для наращивания.

Учесть степень нивелирования размаха колебаний для второго метода трудно. Тем не менее по удлиненным рядам наблюдений строятся графики обеспеченности, позволяющие составлять вероятностные оценки с достаточной для практических целей достоверностью.

2. Метод связи между статистическими параметрами короткого и длинного рядов по С.Н. Крицкому и М.Ф. Менкелю. Этот метод позволяет исключить систематические ошибки, но не дает представлений о календарных колебаниях уровней подземных вод. Получение многолетних статистических параметров по короткому ряду наблюдений осуществляется путем нахождения следующих переходных коэффициентов для периода n совместных наблюдений короткого и длинного рядов:

$$\bar{y}_{\text{к}}^{(n)}/y_{\text{д}}^{(n)} = k_1;\ C_{V_{\text{к}}}^{(n)}/C_{V_{\text{д}}}^{(n)} = k_2;\ \sigma_{\text{к}}^{(n)}/\sigma_{\text{д}}^{(n)} = k_3.$$

Установив эти соотношения, искомые многолетние параметры для короткого ряда наблюдений определяются по формулам:

$$\bar{y}_k^{(N)} = k_1 \bar{y}_{\text{д}}^{(N)},\ C_{V_{\text{к}}}^{(N)} = k_2 C_{V_{\text{д}}}^{(N)},\ \sigma_{\text{к}}^{(N)} = k_3 \sigma_{\text{д}}^{(N)},$$

где $\bar{y}_{\text{д}}^{(N)}$, $C_{V_{\text{д}}}^{(N)}$, $\sigma_{\text{д}}^{(N)}$ — соответственно среднее многолетнее значение уров-

ня, коэффициент вариации и срднеквадратичное отклонение для ряда-аналога за весь период наблюдений N лет.

В данном случае по новым более достоверным статистическим параметрам $y_к^{(N)}$, $C_{V_к}^{(N)}$, $\sigma_к^{(N)}$, задаваясь соотношением $C_s/C_V = 2$, строятся более достоверные теоретические кривые обеспеченности, с которых снимаются искомые минимальные (95%-ной обеспеченности) уровни или мощности водоносного горизонта.

При нормальном законе распределения значений длинного и короткого рядов наблюдений аналогичным приемом можно приближенно (способом Вильда) получить искомое минимальное многолетнее значение уровня короткого ряда. Для этого устанавливается коэффициент связи минимальных за период n совместных наблюдений уровней короткого и длинного рядов и по нему определяется искомое значение минимального за многолетие уровня в коротком ряду

$$k = H_k^{(n)} / H_у^{(n)};\ H_{min}^{(N)} = k H_д^{(N)},$$

где $H_k^{(n)}$ и $H_д^{(n)}$ — уровни или мощности короткого и длинного рядов за период совместных наблюдений n, выраженные в относительных или абсолютных отметках; $H_{min}^{(N)}$ и $H_д^{(n)}$ — то же, но за длительный период наблюдений N лет.

Имеются и другие пути удлинения коротких рядов наблюдений по статистическим параметрам.

Во всех случаях для надежного наращивания коротких рядов необходимо иметь минимум шесть—семь лет наблюдений. При более коротких рядах наблюдений оценка возможных многолетних колебаний уровней подземных вод становится более сложной и менее достоверной.

3. Метод множественной корреляции между уровнями подземных вод и серией режимообразующих факторов. Этот метод используется в случае, если парные корреляционные связи характеризуются низкими коэффициентами корреляции менее 0,7—0,75, что свидетельствует о существенном участии в формировании режима подземных вод не одного, а серии различных факторов. Для выбора значимых факторов на первом этапе составляется матрица корреляционных связей искомых параметров режима подземных вод от ряда возможных факторов, по которым имеются длинные ряды наблюдений. Среди таких могут быть атмосферные осадки (годовые и эффективные), температуры воздуха (годовые и теплого периода), дефицит влажности воздуха (годовой и теплого периода), индексы атмосферной циркуляции по Б.Л. Дзердзеевскому или Г.Я. Вангенгейму, накопление льда в ледниках и др. Для последующего анализа отбираются три-четыре наиболее значимых и менее всего коррелируемых между собой фактора. Статистическая значимость коэффициентов корреляции оценивается по таблицам в зависимости от длины коррелируемых

рядов [20]. По отобранным значимым факторам составляется уравнение множественной корреляции типа

$$y_0 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4.$$

Методы расчета коэффициентов этого уравнения и его анализа рассмотрены во многих работах [20, 23, 46 и др.].

Имеются и другие пути удлинения коротких рядов наблюдений по серии известных факторов, например метод весовых функций или черного ящика, в которых могут быть учтены временные сдвиги в связях между режимом подземных вод и определяющими его факторами.

По нарощенным любым способом рядам строятся графики обеспеченности и определяются необходимые расчетные значения мощностей водоносных горизонтов 50, 90, 95 или 99%-ной обеспеченности.

ОЦЕНКА И УЧЕТ МНОГОЛЕТНИХ ТРЕНДОВ ПРИ ВЫБОРЕ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучение многолетних закономерностей режима уровней подземных вод и подземного стока по территории СССР показали, что во многих регионах страны отмечается многолетняя направленность к снижению или подъему уровней подземных [19]. Изменения в уровнях подземных вод даже в естественных или в слабонарушенных условиях достигают ± 1–3 см/год, а в модулях подземного стока ± 0,3, иногда до 0,7 л/с. км^2. Так как последние определялись по минимальным зимним среднемесячным значениям поверхностного стока, можно сделать вывод, что подобные тенденции отмечаются и в расходах, и в уровнях рек, что может сказаться не только на изменениях мощностей водоносных горизонтов, но и в размерах привлекаемых запасов во времени. Причиной появления таких многолетних трендов в режиме поверхностных и подземных вод служат изменения в глобальном климате и микроклиматических условиях отдельных регионов. Доказательством этому служит то, что аналогичного знака тренды встречены во многих природных факторах, имеющих влияние на подземные воды, — в солнечной активности, атмосферной циркуляции ветров, температурах воздуха и т. д. Наряду с этим значительную роль в формировании трендов различной направленности играет хозяйственная деятельность людей.

Направленность трендов может быть различной по знаку, однако расчет средневзвешенных по площади трендов показал [19], что в настоящее время преобладают процессы, приводящие к истощению запасов подземных вод.

Исследованиями установлено, что наряду с статистически незначимыми трендами, появление которых может рассматриваться как случайное (даже если они визуально улавливаются на графиках многолетних колебаний уровней и расходов подземных вод), могут встречаться тренды с существенными темпами направленной изменчивости в режиме подзем-

ных вод. Недоучет таких трендов может привести к значительным ошибкам (как к завышению, так и к занижению эксплуатационных запасов подземных вод). Поэтому в условиях с напряженным режимом восполнения и ограниченной мощностью водоносных горизонтов важно оценить наличие или отсутствие таких трендов и в случае существенной роли трендов в изменениях расчетных мощностей или восполнения запасов подземных вод учесть их в расчетах.

Анализ показывает, что тренды могут быть линейными и нелинейными.

Линейные тренды можно установить на основе парных корреляционных связей между значениями анализируемого ряда (среднегодовыми или минимальными годовыми) и их порядковыми номерами. При этом получается уравнение прямой линии для тренда и оценивается коэффициент корреляции такой связи.

Нелинейные тренды описываются полиномами низких степеней (до трех-четырех) или кривыми логарифмического, экспоненциального или синусоидального типов.

Оценка значимости линейных трендов может быть проведена уже по величинам коэффициентов корреляции. При коэффициентах корреляции $< 0{,}1-0{,}2$ судить о реальности существования каких-либо трендов и даже об их знаке трудно и нецелесообраэно. При коэффициентах корреляции $> 0{,}3-0{,}5$ даже для такой грубой аппроксимации, как выделение линейного тренда на фоне значительных многолетних колебаний подземного стока и уровней подземных вод, можно утверждать, что реальность наличия тренда довольно высока. Тем не менее для уверенного определения реальности существования трендов и выбора наиболее достоверного критерия их значимости целесообразно проведение специальных оценок степени их статистической достоверности.

Оценка степени достоверности вскрытых трендов может быть выполнена различными способами: расчетом рангового коэффициента корреляции Спирмена, методом анализа числа скачков и смены знака колебаний, а также способом, рекомендуемым Всемирной метеорологической организацией (ВМО) [22].

Расчет рангового коэффициента Спирмена ρ производится по формуле

$$\rho = 1 - \frac{6 \Sigma d_i^2}{N^3 - N}, \qquad (4.7)$$

где d_i^2 — разность между порядковым номером и рангом каждого хронологического значения анализируемого ряда длиной N членов.

Ранжирование ряда производится от меньшего значения к большему. Ранговый коэффициент ρ имеет значения от -1 до $+1$. При этом значения близкие к -1 свидетельствуют о наличии отрицательного тренда, а близкие к $+1$ — о наличии положительного тренда. Значения близкие к нулю показывают на отсутствие тренда. Об условном существовании трендов можно говорить при $\rho > |0{,}5|$.

Оценка достоверности существования трендов методом скачков и смены знака заключается в расчете математического ожидания E, диспер-

сии V случайного процесса и вероятности $\phi(Z)$ случайного или неслучайного появления скачков и смены знака в многолетних колебаниях уровней или расходов подземных вод. Допустив гипотезу о случайном и нормальном распределении элементов изучаемой дихотомической последовательности, расчет проводят по формулам

$$E(u) = \frac{2n_1 n_2}{n_1 + n_2} + 1; \tag{4.8}$$

$$V(u) = \frac{2n_1 n_2 (2n_1 n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 (n_1 + n_2 - 1)}; \tag{4.9}$$

$$Z(u) = \frac{u - E(u)}{\sqrt{V(u)}}, \tag{4.10}$$

где n_1 и n_2 — число значений ряда, находящихся соответственно ниже или выше его медианного значения; u — число скачков группировок последовательных хронологических значений ряда с однотипным по знаку отклонения от его медианы.

Полученному значению Z по таблицам нормального распределения [11] находится соответствующая вероятность $\phi(Z)$ того, что флуктуации значений в анализируемом ряду случайны. При $\phi(Z) < 0{,}01$ гипотеза о случайности колебаний отвергается и признается наличие тренда.

Аналогично проводится расчет и по числу смены знака колебаний:

$$E(t) = \frac{2N - 4}{3};$$

$$V(t) = \frac{16N - 29}{90};$$

$$Z(t) = \frac{t - E(t)}{\sqrt{V(t)}},$$

где $N = n_1 + n_2$ — длина ряда наблюдений; t — число точек перегибов графика колебания, определяющих изменение знака процесса, т. е. точек изменения колебаний с восходящих на нисходящие, и наоборот.

Отсутствие тренда или принятие случайного расположения элементов последовательности оценивается в тех случаях, когда величина вероятности $\phi(Z)$ оказывается менее допустимой при 0,025 уровне значимости, т. е. по абсолютной величине менее 1,96 [11]. При $\phi(Z) > 1{,}96$ наличие тренда считается статистически достоверным.

Оценка достоверности существования многолетних тенденций по рекомендуемой ВМО методике проводится по формулам:

$$Z = 3P\sqrt{\frac{n_0}{N + 25}};$$

$$n_0 = \frac{N(N-1)}{4};$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n=1} n_i}{n_0} - 1,$$

где n_i – число последующих членов ряда, не превышающих по абсолютной величине каждый данный i-тый член ряда (для рядов по уровням подземных вод, измеренным в глубинах от поверхности земли); N – длина ряда наблюдений.

Для рядов подземного стока, выраженных в абсолютных значениях расходов, n_i оценивается как число предыдущих членов ряда, не превышающих по величине каждый данный i-тый член ряда.

Признание наличия тренда осуществляется также по величинам $\phi(Z) > |1{,}96|$, т. е. для 0,025 или 0,975 уровня значимости. Следует подчеркнуть, что ни один из всех этих критериев, как и большинство статистических оценок, не имеет строгой границы, определяющей наличие или отсутствие трендов. Все они, как и выбор уровня значимости оценок (97,5; 95 или 90%-ной обеспеченности), весьма условны. Поэтому количественные формы анализа необходимо сочетать с экспертным осмысливанием исходного материала. Формальные количественные критерии могут лишь свидетельствовать о большей или меньшей уверенности в существовании трендов, о наличии тенденций к трендам или их отсутствии.

Анализ достоверности трендов различными методами показал, что о реальном существовании трендов можно достаточно уверенно говорить при коэффициентах корреляции связи $Q = f(t)$, превышающих 0,4, особенно для рядов продолжительностью свыше 30 лет. В ряде случаев явные тенденции к трендам проявляются даже при $r = 0{,}2–0{,}33$. Можно отметить, что отражающие наличие трендов коэффициенты корреляции связи хронологических значений ряда с их порядковыми номерами не обязательно должны быть высокими. Эта связь имеет целью не описание и прогноз анализируемого процесса, а выделение его динамической нормы и определение знака и темпа ее изменчивости во времени. Поэтому в естественных процессах, тем более характеризующихся высокой динамичностью колебаний относительно нормы (т. е. с большими коэффициентами вариаций), коэффициенты корреляции таких связей могут быть очень малыми. Важно, чтобы они были статистически значимыми. Высокие коэффициенты корреляции таких связей свидетельствуют о нарушенности процесса, когда его многолетняя направленность начинает проявляться более четко по сравнению с естественными колебаниями.

Дополнительную уверенность в наличии или отсутствии трендов может дать различный анализ рядов по двум-трем критериям. Достаточно хорошие по сопоставимости результаты оценки достоверности трендов дают критерий Спирмена и методика ВМО. Они, как правило, хорошо увязываются с коэффициентами корреляции связи $Q = f(t)$ как по величинам,

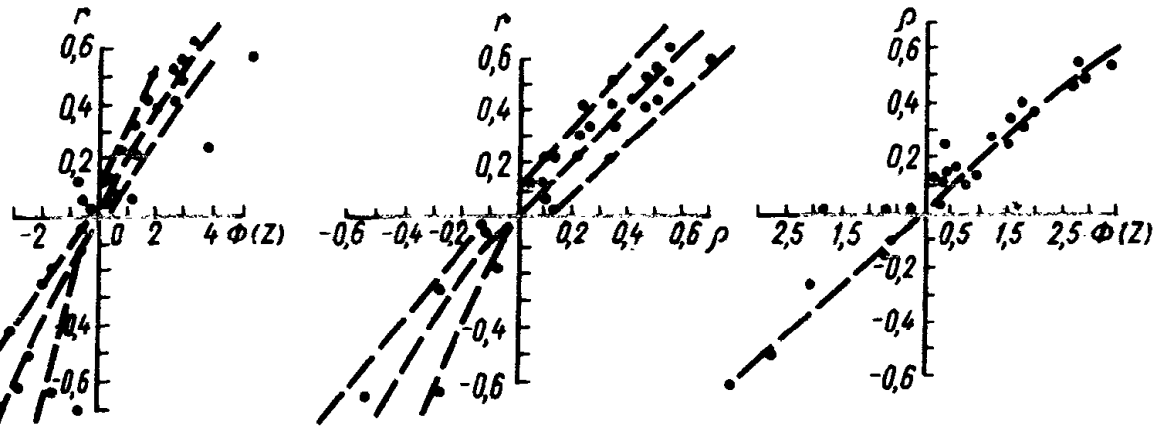


Рис. 14. Графики связи результатов оценки достоверности трендов

так и по знаку (рис. 14). Поэтому в целях исключения случайности оценку реальности существования трендов лучше всего производить по комплексу критериев r, ρ и Z.

Оценки достоверности трендов методом скачков и точек перегибов не дают такой сопоставимости результатов, и поэтому они показывают скорее качественный результат, чем количественный. При малых значениях темпов изменчивости уровней подземных вод и подземного стока (менее 1 см/год и менее 0,01 л/с. км^2), даже если такие тренды оказываются статистически значимы при оценках эксплуатационных запасов подземных вод и естественных ресурсов подземных вод, ими можно пренебречь. В ряде случаев темпы изменений трендов могут возрасти на порядок и более. Поэтому выявленные по таким регионам четко проявляющиеся тенденции к изменению питания подземных вод в многолетнем разрезе должны приниматься во внимание при планировании использования подземных вод и оценках их эксплуатационных запасов как с точки зрения возможного ухудшения условий водоснабжения (при отрицательном тренде), так и возможного увеличения водоотбора подземных вод в будущем (при положительном тренде). Ущерб и выигрыш в запасах подземных вод при этом могут быть весьма существенными, несмотря на, казалось бы, небольшие размеры темпа снижения или увеличения модулей подземного стока. В таких оценках необходимо принимать во внимание длительность периодов эксплуатации подземных вод (25—27 лет) и величину площадей воронок депрессий. Это может значительно уточнить изменения в запасах подземных вод во времени, которые могут оказаться иногда соизмеримыми с их расчетными величинами.

Для естественных и слабонарушенных условий характерны линейный и близкий к синусоидальному тренды. Наиболее обоснованной экстраполяцией здесь может быть лишь экстраполяция линейного тренда. В нарушенных условиях преобладают логарифмические и экспоненциальные тренды, т. е. тренды с тенденцией к стабилизации. Такого типа кривые

следует экстраполировать в будущее и от них уже отсчитывать допустимые понижения уровней подземных вод в районах и действующих и проектируемых водозаборов.

ИЗУЧЕНИЕ И УЧЕТ ВНУТРИГОДОВЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изучение внутригодовых особенностей режима подземных вод имеет многоцелевое назначение и проводится при решениях следующих задач: 1) обоснование оптимальных сроков проведения опытно-фильтрационных работ; 2) обоснование сроков гидрохимического опробования водоносных горизонтов и изучение изменчивости качества воды; 3) оценка возможной изменчивости расчетной мощности водоносного горизонта по сезонам года; 4) оценка необходимости внесения поправок на изменчивость режима при определении фильтрационных свойств пород в период опытных откачек; 5) изучение режима восполнения запасов подземных вод; 6) обоснование оптимального сезонного режима эксплуатации.

Выявление закономерности внутригодового или сезонного режима подземных вод проводится как по специальной, так и по опорной наблюдательной сети минимум два года, если эти годы сравнительно хорошо отличаются по степени водности, т. е. не менее чем на 10 % обеспеченности. Если оба года имеют примерно одинаковую водность, то наблюдения должны быть продолжены. В противном случае приведение этих лет к многолетнему ряду изложенными выше способами будет малодостоверным. Опытно-фильтрационные работы целесообразнее всего приурочить к периодам устойчивой межени, так как при более высоких и неустойчивых уровнях могут меняться не только мощности пласта, но и фильтрационные свойства опробуемой части горизонта и граничные условия.

Особенно важно данные наблюдений за сезонным режимом подземных вод учитывать при достаточно длительных откачках, т. е. в случаях, когда естественный спад или подъем уровней за период откачки может оказаться соизмеримым с величиной понижения. Подобные случаи бывают довольно часто в карстовых районах, где амплитуды сезонных колебаний уровней подземных вод значительны (от 5 до 20 м) и длительность откачек, необходимых для обоснования надежности применения гидравлических методов расчетов запасов подземных вод, сравнительно велика (от 1 до 2 мес). В таких случаях необходимо внесение корректур в наблюдаемые данные снижения и восстановления уровней в целях учета естественного режима перед использованием их для определения расчетных параметров. Подобный учет режима может быть сделан путем линейной экстраполяции наметившегося перед откачкой спада уровня и на основе расчетов этого спада по Майе-Буссинеску. Обоснование той или другой формы экстраполяции уровней может быть сделано по установленному характеру изменений естественных уровней в период откачки по наблюдательной скважине, находящейся за пределами воронки депрессии, или установленной ранее закономерности поведения уровней в данный

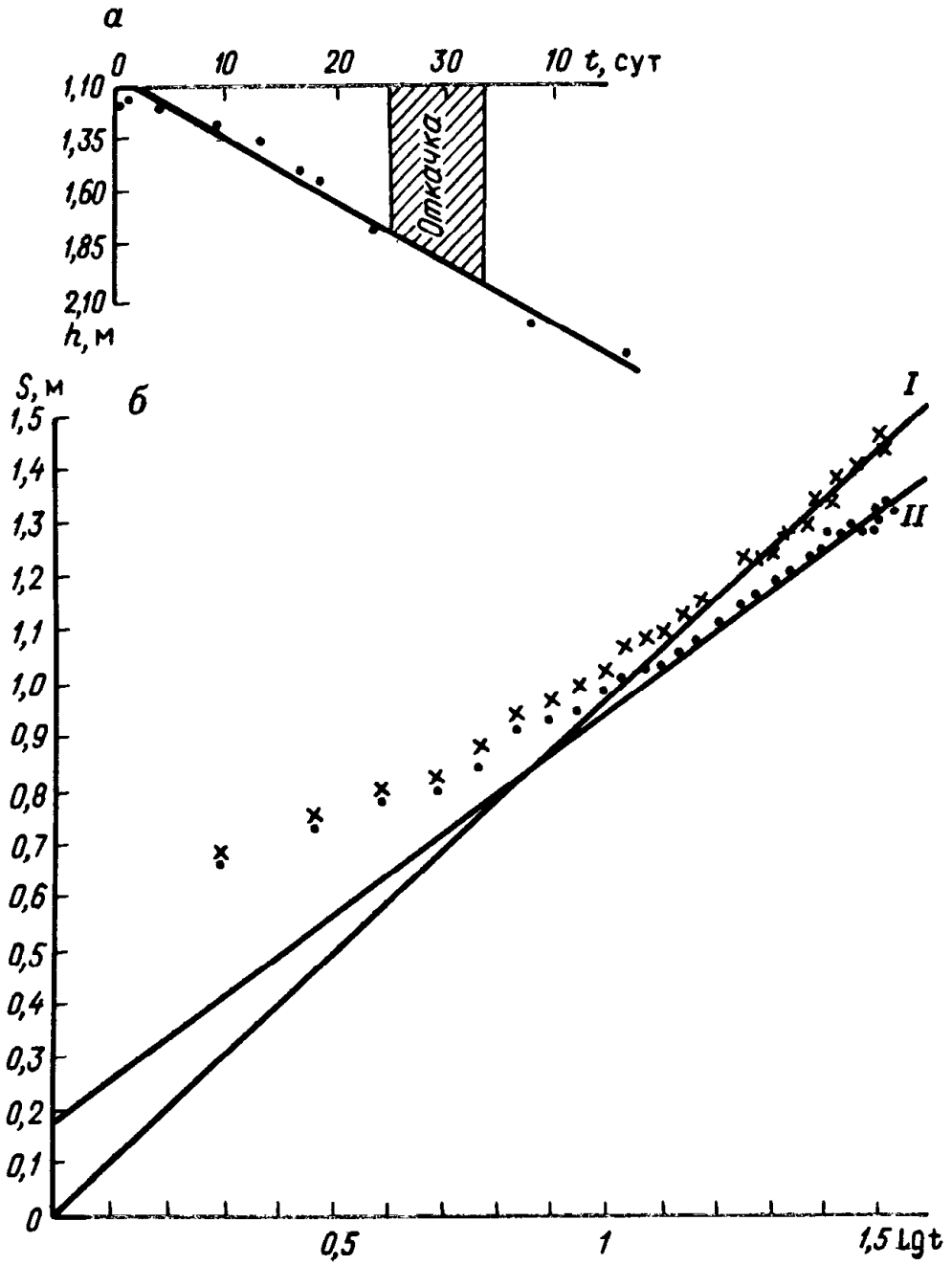


Рис. 15. Оценка влияния снижения уровня грунтовых вод (*h*) на величину понижения (*S*) в процессе откачки (по материалам ПГО "Востокказгеология").

а — график спада уровня; *б* — графики временного прослеживания, построенные без учета (*I*) и с учетом (*II*) естественного спада уровня

период года. Для линейной экстраполяции или интерполяции можно использовать хронологические графики режима уровней подземных вод, по которым устанавливают средний темп спада уровней для периода откачки и вносятся эти поправки в графики снижения уровней под влиянием откачки (рис. 15, *а*). Такие поправки могут иногда существенно изменить характер графиков прослеживания (см. рис. 15, *б*), что позволяет скорректировать получаемые по ним расчетные параметры. Существенными могут быть изменения в уровнях подземных вод в процессе откачек и в зонах влияния рек, например на зарегулированных водохранилищами реках, связанных с режимом работы гидроэлектростанций.

Вызванные последними попуски определяют не только сезонный, но и недельный и даже суточный режим поверхностного стока, который может серьезно изменить характер поведения уровней подземных вод h и дебитов откачек Q в процессе опытно-фильтрационных работ (рис. 16). При незначительных колебаниях уровней воды в реке, происходящих относительно какого-либо сравнительно постоянного уровня, расчетные значения уровней и расходов, используемые для определения параметров, могут сниматься с усредняющих их кривых или прямых. При направленных же изменениях уровней поверхностных вод могут быть отмечены значительные колебания в уровнях и дебитах откачек, способные существенно исказить результаты опыта. Особенно важен учет таких колебаний для водозаборов, эксплуатирующих аллювиальные отложения малой мощности, соизмеримой с колебаниями уровней воды в реке (см. рис. 16). Изменения в уровнях подземных вод следуют с некоторым временным сдвигом за колебаниями уровней воды в реке и изменяют в свою очередь мощность горизонта, величину понижения уровней при откачке и дебит откачки. Обработка данных таких откачек осложняется, так как в этом случае необходимо строить графики прослеживания в координатах $\frac{S(2H-S)}{Q} = f(\lg t, \lg r, \lg \frac{t}{r^2})$ с постоянным внесением соответствующих корректур в H, S и в Q. Техника внесения таких поправок может быть облегчена построением серий соосных графиков связи: *а*) расхода и уровней воды в реке, если имеются наблюдения только за расходами воды в реке; *б*) мощностей водоносного горизонта и понижений уровня; *в*) мощности горизонта и дебита откачки (рис. 17). По таким графикам для каждого момента времени, зная расход реки, можно определить уровень воды в реке (график *а*), по нему определить мощность водоносного горизонта (графики *а* + *в*), а затем — понижение (график *б*) и по понижению — дебит откачки.

При изучении режима восполнения запасов подземных вод необходимо оценить многолетнюю изменчивость амплитуд сезонных колебаний уровней подземных вод. Для этого строится график распределения амплитуд за многолетие по ряду-аналогу, определяются сезонные амплитуды колебаний уровней на участке водозабора для двух лет различной водности и затем по графику, аналогичному изображенному на рис. 12, определяются средние за многолетие величины сезонных амплитуд или минимальные сезонные амплитуды для года 95%-ной обеспеченности и по ним уже определяют среднее или минимальное за год питание подземных вод атмосферными осадками $Q = \Delta h \mu F$, где Δh — амплитуда сезонных колебаний уровней подземных вод; μ — водоотдача или недостаток насыщения пород; F — площадь месторождения.

При восполнении запасов подземных вод за счет поглощения речных вод во время паводка сезонный режим уровней подземных вод и величина восполнения запасов зависят от площади затопления и продолжительности состояния паводка на пойме. Аналитическая оценка питания в таких усло-

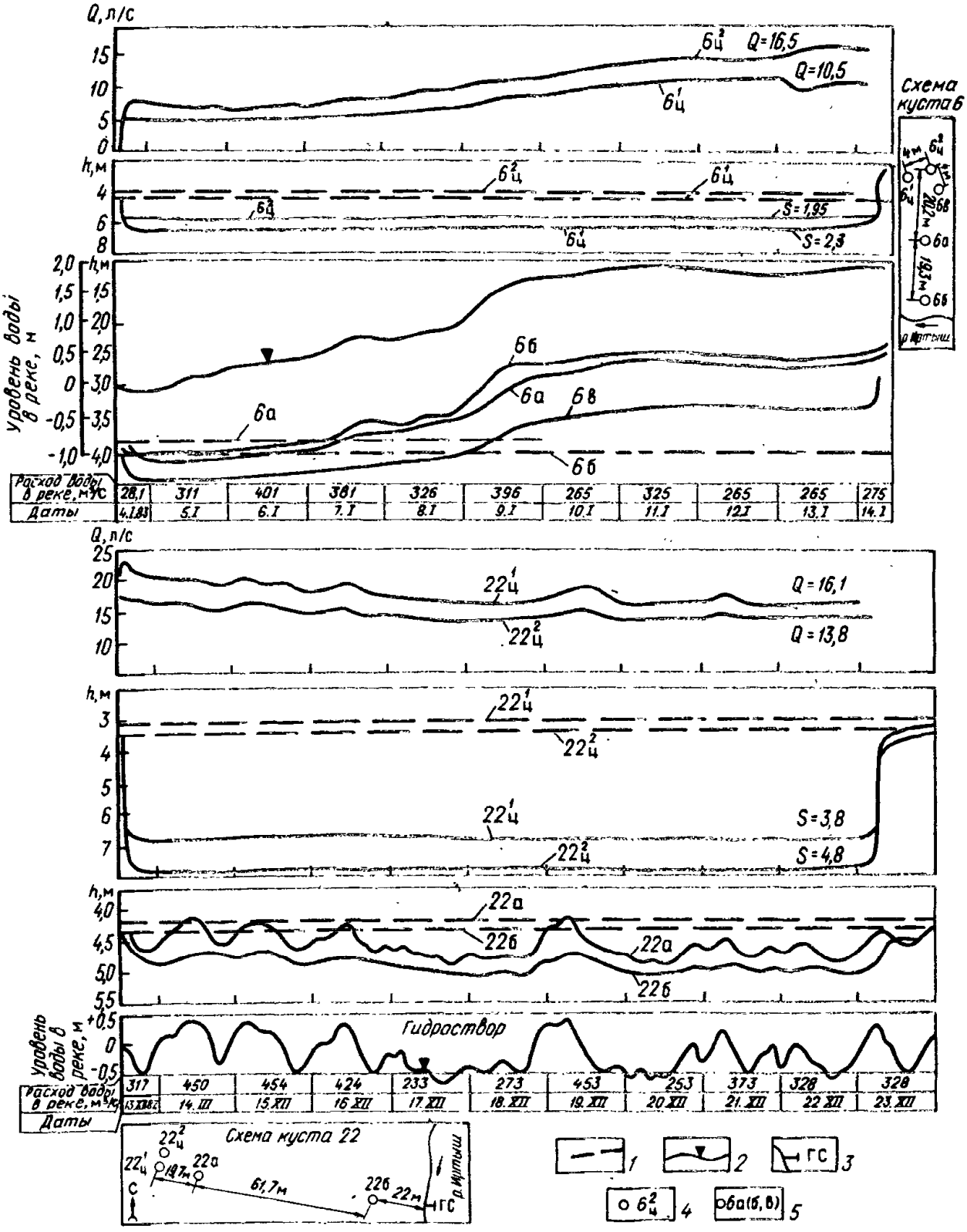


Рис. 16. Графики опытных кустовых откачек вблизи реки (по материалам ПГО "Востокказгеология").

1 — статический уровень; *2* — уровень воды в реке; *3* — гидроствор; *4 – 5* — номера скважин: *4* — центральных, *5* — наблюдательных

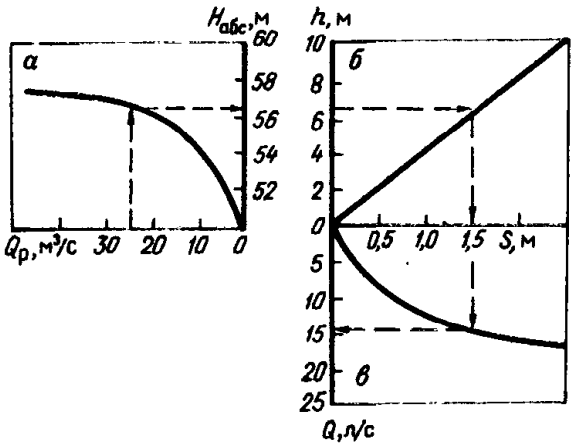


Рис. 17. Соосные графики зависимостей расхода ($Q_р$) и уровней воды в реке H (*а*); уровней воды в реке, мощности (h) водоносного горизонта (*а* + *б*), уровней и понижения (*б*); дебита откачки (Q) и понижения (*в*)

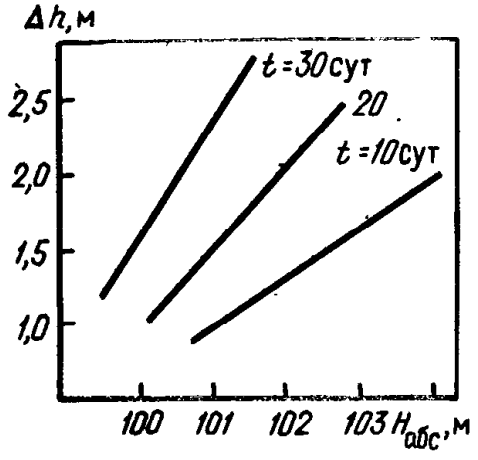


Рис. 18. График зависимости амплитуд сезонных колебаний уровней подземных вод (Δh) от высоты (H) и продолжительности паводка (t)

виях может осложняться трудностью определения и учета фильтрационной неоднородности пойменных отложений и особенностей микрорельефа на площади затопления, которые в значительной мере определяют размеры инфильтрации. Поэтому величины сезонных колебаний уровней подземных вод, а следовательно, и величины сезонного восполнения запасов целесообразнее определить корреляционным способом, установив по эмпирическим наблюдениям связи между амплитудами колебаний уровней подземных вод, с одной стороны, и абсолютными отметками воды в реке и продолжительностью паводка — с другой. Уравнение связи будет иметь вид

$$\Delta h = a_0 + a_1 H + a_2 t,$$

где Δh — амплитуда сезонных колебаний уровня подземных вод; H — абсолютная отметка уровня воды в реке, м; t — время высокого стояния уровня, измеряемое с момента выхода воды на пойму до момента ее осушения, сут; a_0, a_1, a_2 — коэффициенты уравнения.

Указанная связь может быть установлена и графически (рис. 18). Составив графики обеспеченности для уровней воды в реке и времени затопления поймы и сняв с них значения H и t для года 95%-ной обеспеченности, по полученному уравнению или графику связи можно определить не только минимально возможное сезонное питание подземных вод, но и оценить возможное его изменение, если в результате зарегулирования режима реки могут измениться ее уровни в паводок и продолжительность его прохождения (что оценивается гидрологическими расчетами). Годы 95%-ной обеспеченности по H и по t могут и не совпадать, а поэтому рекомендуемый способ расчета не может быть заменен прямым анализом изменчивости Δh за многолетие.

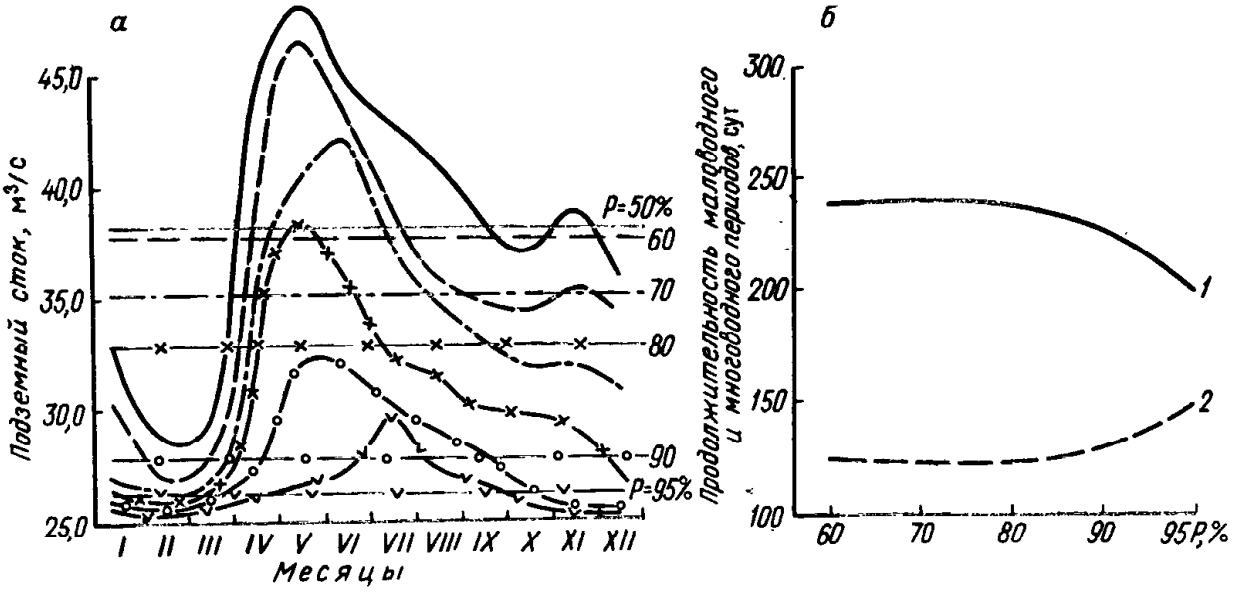


Рис. 19. Графики зависимости внутригодового режима и среднегодовых величин подземного стока (*а*), а также продолжительности маловодного (*1*) и многоводного (*2*) периодов в течение года (*б*) от заданной расчетной обеспеченности для бассейна р. Медвенка

При наличии возможности организации режима водоотбора соответствующего режиму восполнения запасов подземных вод, что согласовывается с потребителем, требуется установить типичный и гарантированный внутригодовой режим восполнения. Для этого по многолетним рядам наблюдений для каждого месяца в отдельности строится график обеспеченности уровней подземных вод. Затем по этим графикам определяют значения для уровней 95, 90, 80, 70 и 50%-ной обеспеченности каждого месяца, строятся графики внутригодового режима и рассчитываются среднегодовые значения для лет каждого из выбранных значений обеспеченностей (рис. 19). Такие графики могут служить основой для обоснования внутригодового режима водоотбора и определения возможной продолжительности маловодного периода, на который рассчитывается сработка емкости водоносного горизонта при соответствующем обосновании гарантии последующего восполнения сработанных запасов подземных вод.

ИССЛЕДОВАНИЕ И УЧЕТ ВЕРОЯТНЫХ ЧЕРЕДОВАНИЙ МАЛОВОДНЫХ И МНОГОВОДНЫХ ПЕРИОДОВ

Одним из способов повышения точности оценок эксплуатационных запасов подземных вод служит учет возможной многолетней и сезонной изменчивости режима уровней и расходов подземных вод. В настоящее время такой учет осуществляется путем использования в расчетах значений уровней, дебитов родников или расходов рек, обеспечивающих восполнение запасов подземных вод, приведенных к минимальным среднемесячным значениям маловодного года 85 и 95%-ной обеспеченности

(в зависимости от категории водозабора или объекта по надежности водообеспечения).

Помимо условности указанных обеспеченностей данный подход создает определенный "запас прочности", так как предусматривает, согласно теории вероятностей, что, например, при 95%-ной обеспеченности все пять из ста значений меньше принятого расчетного могут встретиться не только в разбивку, но и подряд. Другими словами, это означает, что маловодная серия с расходами или уровнями ниже 95%-ной обеспеченности при таком условии может иметь пятилетнюю продолжительность. Анализ же массового материала многолетних наблюдений за режимом подземных вод СССР и других стран показывает, что таких случаев пока не наблюдалось и они исключительно маловероятны [18, 19].

Более реалистические результаты могут дать исследования, позволяющие определить продолжительность таких маловодных серий при различных заданных обеспеченностях расчетных уровней или расходов поверхностных или подземных вод, что позволит установить период, в пределах которого водоотбор будет полностью или частично осуществляться за счет сработки емкости водоносного горизонта.

Как уже неоднократно отмечалось ранее, в многолетних колебаниях уровней подземных вод и подземного стока прослеживается некоторая тенденция к цикличности. Колебания эти далеко не ритмичны и поэтому называются иногда квазициклическими. Невыдержанность таких циклов по амплитудам, периодам и фазам, невысокий вклад циклических составляющих в общую дисперсию процесса (в среднем около 20—25 %), не позволяют использовать данное явление ни для детерминированных прогнозов режима подземных вод, ни в детерминированных расчетах запасов подземных вод.

Наряду с этим нельзя отрицать, что в колебаниях уровней и расходов подземных вод существует хотя и не закономерная, но явно выраженная тенденция к чередованию серий маловодных и многоводных лет. Этим можно объяснить тот факт, что вероятность появления уровней подземных вод близких к максимальным на следующий год после зафиксированных минимальных уровней крайне мала, несмотря на то что в атмосферных осадках — основном источнике питания подземных вод — такое явление встречается довольно часто. Это можно объяснить изолированностью подземных вод от наиболее динамичных гидрометеорологических процессов, а следовательно, относительно высокой инерционностью подземных вод, заключающейся в их замедленной и более сглаженной реакции на внешние воздействия, а также малыми скоростями их фильтрации, приводящими к тому, что уровни подземных вод часто интегрируют увлажненность ряда предыдущих лет. Поэтому переход от периодов с низкой водностью к годам с высокой водностью осуществляется в подземных водах чаще всего плавно и растягивается на годы.

Данное явление может учитываться и должно приниматься во внимание при планировании рациональных форм эксплуатации подземных вод. Принимая во внимание незакономерность чередования маловодных и многоводных лет, учет этого явления должен носить стохастический характер.

Сущность учета вероятных закономерностей чередования серий маловодных и многоводных лет заключается в выявлении продолжительности максимально возможного маловодного периода, во время которого можно срабатывать емкость водоносного горизонта с гарантией того, что по истечении этого периода наступит многоводная серия, во время которой произойдет полное восстановление сработанных запасов подземных вод.

Учет закономерностей вероятных чередований маловодных и многоводных серий особенно важен в тех случаях, когда естественные или изменяющиеся во времени привлекаемые ресурсы (т. е. восполнение запасов подземных вод) играют существенную, если не решающую, роль в структуре эксплуатационных запасов подземных вод. Другими словами, водоотбор складывается главным образом из изменяющегося в сезонном или многолетнем разрезе восполнения запасов подземных вод и частично за счет сработки емкости горизонта в отдельные периоды, когда восполнение не способно обеспечить водоотбор полностью. Такие условия могут быть встречены в следующих случаях.

1. На месторождениях трещинно-карстовых вод, где сезонные и многолетние амплитуды колебаний уровней подземных вод соизмеримы с мощностью водоносного горизонта. Здесь важно определить и оптимальную обеспеченность уровней или расчетных мощностей водоносного горизонта, и установить оптимальную продолжительность маловодного периода, в пределах которого потребуется сработка естественных запасов горизонта. Восполнение этих запасов в последующий многоводный период осуществляется за счет естественного питания подземных вод.

2. На месторождениях подземных вод в долинах малых рек, где проектный водоотбор в отдельные периоды года или в маловодные годы может превышать возможное восполнение из реки или быть на грани этого восполнения. В этом случае определяются оптимальная обеспеченность расходов реки, продолжительность периода, когда водоотбор будет превышать восполнение из реки, а также оценивается возможность водоотбора в маловодный период за счет сработки емкости горизонта и гарантированность восполнения запасов в последующий многоводный период за счет поглощения речного стока в осушенный водоносный горизонт.

При постоянном поверхностном стоке и активной взаимосвязи подземных и поверхностных вод также сохраняется возможность отрыва депрессионной воронки от реки в маловодный период, когда водоотбор превысит расход воды в реке. Оценив по режимным данным скорость снижения уровня поверхностных вод с учетом работы водозабора в меженный период и зная минимально возможную мощность слоя воды в реке в маловодный период, можно определить продолжительность периода перехвата поверхностного стока водозабором, т. е. время снижения уровня реки до дна водотока. Если этот период окажется больше фактически наблюдавшегося максимального за многолетие периода меженного стока в реке (т. е. периода, когда $Q_{\text{реки}} < Q_{\text{водозабора}}$, то отрыва уровня подземных вод от реки не произойдет. В этом случае снижение уровня в реке, не достигнув критической величины, сменится очередным подъемом уров-

ней в последующий период паводка. Если же рассчитанный период будет равен или меньше фактически наблюдавшегося периода межени, то возможен отрыв уровня подземных вод от дна реки. При этом произойдет переход от стационарного к неустановившемуся режиму движения подземных вод при эксплуатации. В данном случае также следует оценивать возможность обеспечения производительности водозабора за счет сработки емкости водоносного горизонта с учетом расхода дождевания.

3. На водозаборах вблизи родников барражного типа, т. е. с наличием водонепроницаемых отложений ниже базиса дренирования родника. При этом особенно существенным может быть эффект учета неравномерности сезонной изменчивости дебитов родников в карстовых районах и районах развития лавовых образований, обладающих высокой водообильностью и высокой динамичностью режима во времени. В этом случае оценивается оптимальная продолжительность маловодного периода, в пределах которого водоотбор может превышать дебит родника и поэтому должен обеспечиваться за счет сработки емкости водоносного горизонта, расположенного ниже базиса дренирования. Восполнение этой емкости будет осуществляться в последующий многоводный период года за счет естественного питания горизонта. Аналогичным образом решается задача и на водозаборах в предгорных зонах, величина водоотбора на которых лимитируется инверсией родников.

4. На месторождениях подземных вод в замкнутых структурах с ограниченной емкостью, когда эксплуатационные запасы подземных вод сдагаются главным образом из сезонного питания и сезонной сработки емкости водоносного горизонта. В этом случае важно оценить продолжительность мало- и многоводного периодов и размеры естественного восполнения запасов подземных вод года оптимальной обеспеченности.

Исследования показали, что продолжительность мало- и многоводных серий зависит как от природных условий (климата регионов литологии водовмещающих пород, глубин залегания подземных вод), так и главным образом от заданной расчетной обеспеченности гарантированного восполнением водоотбора. В последнем легко убедиться, если многолетний график режима подземного стока расчленить горизонтальными линиями, соответствующими величинам подземного стока 50, 60, 70, 80, 90 и 95 % (рис. 20). Средняя продолжительность маловодных периодов в разных районах не одинакова, но везде она постепенно растет с увеличением заданной обеспеченности питания (рис. 21, *а*). Одновременно с увеличением расчетной обеспеченности растет и соответствующая ей величина питания или расходов подземных вод (см. рис. 21 *б*). Таким образом, приняв величину водоотбора, равной не 95, а 90 или 80%-ной обеспеченности питания, можно повысить величину водоотбора в среднем на 20—30 %, а иногда и в 1,5—2 раза. Однако одновременно увеличивается и продолжительность маловодного периода (по данным В.С. Ковалевского, Г.И. Семыкиной). Оптимальной при водоотборе считается такая обеспеченность, при которой после каждой маловодной серии последует более многоводная по продолжительности и по объемам восполнения. Определить эту обеспеченность можно по эмпирическим рядам наблюдений

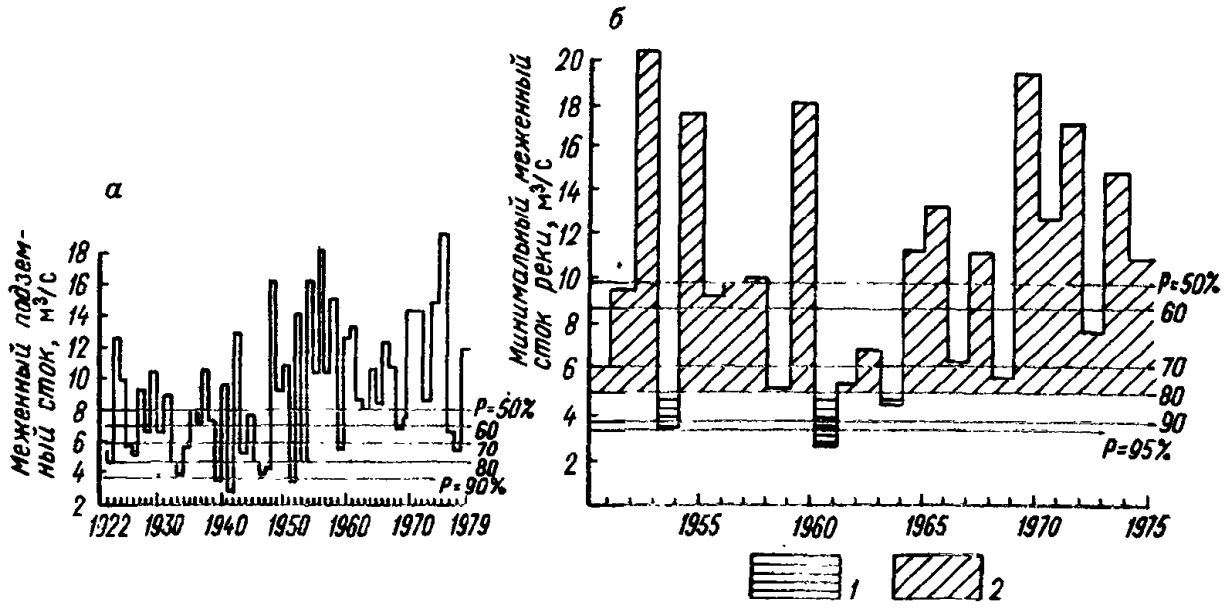


Рис. 20. Определение соотношений продолжительности периодов и объемов маловодных и многоводных лет в бассейнах рек Пярну (*а*) и Стрый (*б*) в зависимости от заданной расчетной обеспеченности подземного стока.

1 — объем дефицита восполнения запасов подземных вод в маловодный период; *2* — объем превышения восполнения над водоотбором в многоводный период

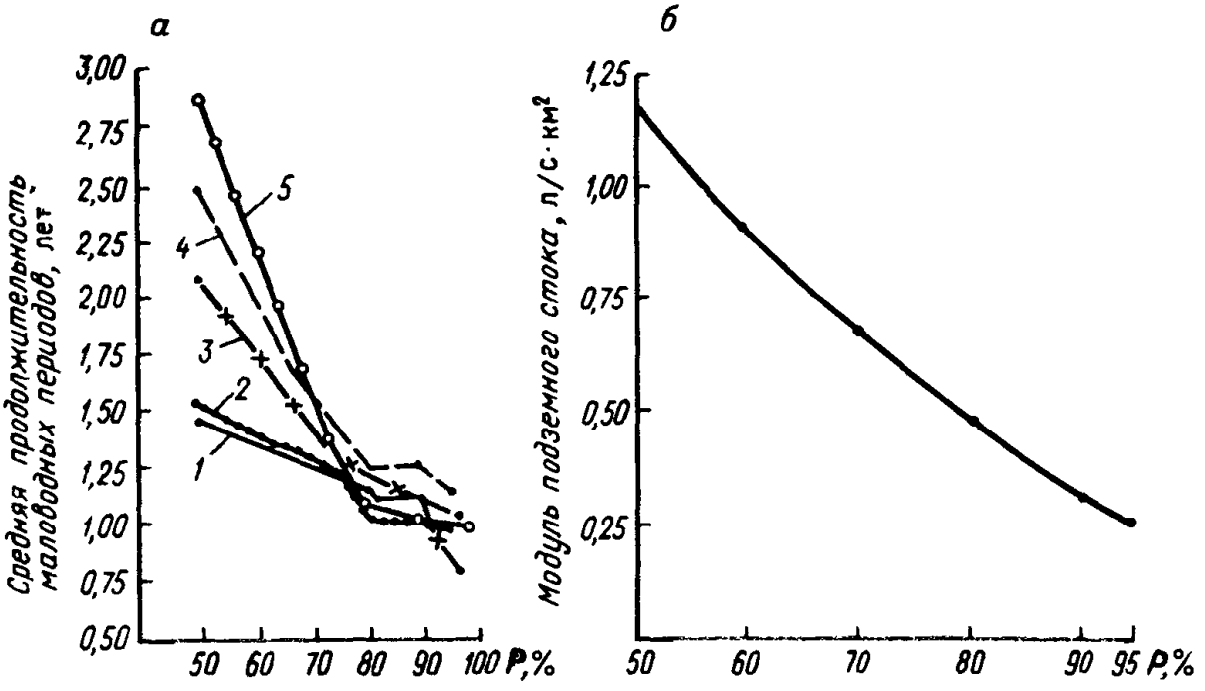


Рис. 21. Графики зависимости продолжительности маловодных периодов и величин модулей подземного стока от заданной расчетной обеспеченности.

1–5 — средняя продолжительность маловодного периоде для районов СССР: *1* — Прибалтийского, *2* — Причерноморского, *3* — Западно-Сибирского, *4* — северной части европейской территории СССР, *5* — Забайкальского

и на основе теоретических расчетов вероятности появления серий различной длины.

Для выбора оптимальной обеспеченности по эмпирическим рядам необходимо иметь длинные ряды наблюдений (фактические или удлиненные тем или иным способом). Наиболее достоверные результаты оценок могут быть получены при длине ряда более 25—30 лет.

Анализируемый ряд разбивается аналогично рис. 20 с интервалами через 10 или 5 % обеспеченности и для каждой обеспеченности, начиная с 50 %, подсчитывается число маловодных серий, перекрываемых по продолжительности и по объемам следующими за ними многоводными сериями. При необходимости разбивка может быть детализирована. Оптимальной принимается та минимальная обеспеченность, при которой во всех 100 % случаев после каждой маловодной серии последовали многоводные с большим восполнением, чем имел место дефицит восполнения в предшествующий маловодный период. Пример такой оценки гарантированности восполнения по бассейну р. Стрый показан в табл. 5 и на рис. 20.

Таблица 5. **Расчет оптимальной обеспеченности расхода р. Стрый**

Расчетная обеспеченность, %	Общее число маловодных лет	Продопжитепьность маловодной фезы, годы (в числитепе), чиспо фез (в знеменетепе)	Чиспо маловодных фез, обеспеченных воспопнением (процентное выражение чиспе фез)
50	8	1/5, 2/2, 4/1	5 (62,2)
60	6	1/5, 4/1	5 (83)
70	4	1/3, 2/1	3 (75)
80	3	1/3	3 (100)
90	2	1/2	2 (100)
95	1	1/1	1 (100)

По приведенному примеру расчета можно сделать следующие выводы: 1) гарантированным восполнением на участке водозабора в бассейне р. Стрый может быть водоотбор, равный 80, 90 и 95%-ной обеспеченности подземного стока; 2) максимально возможным маловодным периодом во всех трех случаях будет однолетний. Лишь при обеспеченности 70 % продолжительность маловодного периода возрастает до двух лет. Оптимальной расчетной обеспеченностью в данном случае будет 80 %, так как при том же маловодном периоде можно использовать более высокий расход подземного стока.

Произведенный при разведке расчет эксплуатационных запасов подземных вод на данном водозаборе выполнялся с учетом минимального 95%-ной обеспеченности стока в реке, равного 3,8 $м^3/с$, минимально возможной мощности водоносного горизонта 8 м и с условием необходимости сохранения санитарного стока в 1,86 $м^3/с$. Расчет производитель-

ности линейного ряда водозаборных скважин по формулам Маскета-Лейбензона и Н.А. Огильви показал при этом возможность отбора 170 тыс. м^3/сут, или 1,9 м^3/с, из 34 скважин с нагрузкой на каждую скважину в 5 тыс. м^3/сут при понижении 4,3 м (53 % мощности), что обеспечивало потребность в воде лишь на ближайшую перспективу.

Выполненный Г.И. Семыкиной перерасчет запасов с учетом минимального стока 80%-ной обеспеченности, составившего 5 м^3/с при мощности водоносного горизонта для года 80%-ной обеспеченности равной 10 м, указал на возможность при той же схеме водозабора и условии сохранения санитарного стока отбора 245 тыс. м^3/сут (2,84 м^3/с) при понижении равном 5 м, т. е. с остаточной мощностью горизонта несколько большей, чем планировалось, с нагрузкой на каждую скважину 7,2 тыс. м^3/сут. При опытных откачках из одиночных скважин водоотбор достигал 5,5 тыс. м^3/сут при понижениях 1,5—3 м и срезках на соседние скважины 0,1—0,2 м, что доказывает возможность отбора 7,2 тыс. м^3/сут из одной скважины. Таким образом, утвержденные запасы (170 тыс. м^3/сут) можно было бы получить с более короткого (на 2,7 км) ряда водозаборных скважин, состоящего из 23 скважин, а проектным водозабором удовлетворить потребность в воде на отдаленную перспективу.

Максимальный единичный расход за счет фильтрации поверхностных вод q (на метр длины русла) определяется по формуле

$$q = \frac{H_0 + m_0}{A_0}, \qquad (4.11)$$

где H_0 — высота слоя воды в реке; m_0 — мощность заиленного слоя в русле реки; $A_0 = m_0/k_0$ — коэффициент сопротивления заиленного слоя; k_0 — коэффициент фильтрации заиленного слоя.

При известных, определенных по откачкам из верхней части водоносного горизонта, гидравлическом сопротивлении русловых отложений ΔL и водопроводимости водоносного горизонта kmA_0 определяется по формуле

$$\Delta L = \sqrt{kmA_0}\ \operatorname{ctg} \frac{2b}{\sqrt{kmA_0}},$$

где b — половина ширины русла реки.

Расчет возможного поглощения стока речных вод по формуле (4.11) при $H_0 = 2{,}5$ км; $m_0 = 0{,}3$ м; $A_0 = 0{,}003$ сут; $\Delta L = 9{,}3$ м и $b = 32$ м показал гарантированность полного восполнения запасов подземных вод за счет поверхностных вод. Даже в исключительно редкие годы 95%-ной обеспеченности, появление которых не исключается, вновь рассчитанный водоотбор равный 2,84 м^3/с будет возможен. В этом случае лишь в течение 10 сут будет снижен санитарный сток на 1 м^3/с.

Выполненный расчет гарантированности восполнения позволяет дать и вероятную оценку условий восполнения при любой расчетной обеспеченности. Как видно из табл. 5, в основе подсчета запасов лежит обеспе-

ченность естественных ресурсов, равная 70%-ной обеспеченности, но при этом видно, что гарантированность восполнения этих запасов составит лишь 75 %. Такие оценки могут быть важны и необходимы в условиях дифицита воды, когда приходится рассчитывать не только утвержденные по высоким категориям запасы подземных вод, но и возможное или периодическое увеличение водоотбора в многоводные периоды, что важно предусмотреть при проектировании трубопроводов от водозабора к потребителям.

Оценка гарантированности восполнения водоотбора является необходимым, но недостаточным обоснованием для проектирования соответствующего водоотбора. Во всех случаях также требуется дополнительно оценивать емкостные возможности водоносного горизонта — способны ли они обеспечить такой водоотбор в течение всего выявленного максимально возможного маловодного периода. Такие оценки делаются на основе гидродинамических расчетов применительно к конкретным гидрогеологическим особенностям месторождения подземных вод, т. е. с учетом реальных расчетных параметров и граничных условий водоносного горизонта. При оценке восполнения из реки потребуется определить способность русловых отложений пропустить такое количество воды. Пропускная способность русловых отложений [28] может быть определена по формуле (4.11), а при условии затопления поймы по формуле

$$q = \frac{\mu S_0 B}{2t_1}\left(1 + \frac{\sqrt{at_2}}{B}\right), \qquad (4.12)$$

где μ — коэффициент водоотдачи; S_0 — превышение паводкового уровня воды в реке над расчетным уровнем подземных вод; B — ширина зоны затопления поймы во время паводка; t_1 — время между началом двух следующих друг за другом паводков; t_2 — время, в течение которого сохранится затопление поймы шириной B; a — коэффициент уровне- или пьезопроводности.

В ряде случаев необходимо оценить гарантированность того, что при выбранной определенной расчетной обеспеченности расходов подземных вод их объемы в последующий многоводный период всегда (т. е. в 100 % случаев или с заданным уровнем гарантии, например, в 95 % случаев) превысят объемы сработанных запасов подземных вод в маловодный период. Эта задача также может быть решена эмпирическим путем на основе анализа длинных рядов наблюдений. Пример такого анализа показан на рис. 20, *б*, из которого видно, что при размерах водоотбора, соответствующих подземному стоку 90, 80 и даже 70%-ной обеспеченности, объемы многоводных серий превышают указанный водоотбор во всех 100 % случаев и оказывается больше объемов необходимой компенсации сработки емкости водоносного горизонта. При водоотборе, соответствующем невысоким степеням, менее 80 %, обеспеченности подземного стока, восполнения сработанных запасов подземных вод в ряде случаев не произойдет. Поэтому при определении оптимальной для каждого конкретного бассейна обеспеченности подземного стока необходима двухступенчатая оценка

оптимальности — по продолжительности мало- и многоводных серий (по превышению продолжительности маловодных серий над маловодными) и по объемам стока в пределах этих серий (по превышению восполнения запасов подземных вод в многоводные периоды над объемами их сработки в маловодье).

Сопоставление этих двух основных форм обоснования оптимальной обеспеченности размеров водоотбора по различным бассейнам территории СССР показывает, что наиболее жестким критерием является первый, т. е. по продолжительности серий. В подавляющем большинстве случаев оптимальные обеспеченности, рассчитанные во времени, оказались также оптимальными и (даже с большим запасом) при расчетах оптимальных обеспеченностей по объемам. Поэтому в большинстве случаев оптимальную обеспеченность можно оценивать только по продолжительности маловодных и многоводных периодов.

Оценку вероятности появления числа и длин серий маловодных и многоводных лет можно произвести и на основе теоретических расчетов. Так, расчет количества возможных серий при слабой внутренней взаимосвязанности членов ряда можно произвести по формуле

$$\tau_m = (P + \frac{1}{n}) \frac{C_{n \cdot P - 1}^{n - m - 1}}{C_n^{nP}},$$

где τ_m — доля каждой серии маловодных лет в выборке в долях единицы; P — обеспеченность (вероятность) маловодных серий; $(1 - P)$ — обеспеченность (вероятность) многоводных серий; n — число членов в выборке; m — длительность серий в годах; C_{xy}^{x} — сочетания из "x" элементов по

$$y = \frac{x!}{y!\ (x - y)!}.$$

В качестве примера можно привести выполненный Г.И. Семыкиной расчет вероятного числа серий маловодных лет в выборе из 50 членов при заданной обеспеченности 70 % (или в долях единицы — 0,7). Тогда доля серий длительностью в 1 год ($m = 1$) в выборке составит:

$$\tau_{m=1} = (0{,}7 + \frac{1}{50}) \frac{C_{50 - 1 - 1}^{35}}{C_{50}^{35}} = 0{,}72 \quad \frac{48!\ 35!\ 15!}{34\ \ 14\ \ 50} = 0{,}154.$$

Число серий θ маловодных лет длительностью в 1 год при этом составит: $\theta_{m=1} = \tau_{m=1}$; $n = 0{,}154 \cdot 50 = 7{,}7$ раза.

Аналогичным образом при $m_{35-1} = 2$

$$\tau_{m=2} = (0{,}7 + \frac{1}{50}) \frac{C_{50 - 1 - 1}}{C_{50}^{35}} = 0{,}045;$$

$\theta_{m=2} = 0{,}046 \cdot 50 = 2{,}25$ раза.

При $m = 3$

$$\tau_{m=3} = (0{,}7 + \frac{1}{50}) \frac{C_{50-1-1}^{34}}{C_{50}^{35}} = 1{,}24 \cdot 10^{-2};$$

$\theta_{m=3} = 1{,}24 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 0{,}62$ раза.

При $m = 4$

$$\tau_{m=4} = (0{,}7 + \frac{1}{50}) \frac{C_{50-1-1}^{34}}{C_{50}^{35}} = 3{,}2 \cdot 10^{-3};$$

$\theta_{m=4} = 3{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0{,}16$ раза.

Вероятность появления в выборке из 50 членов более длительных маловодных серий ($m = 5, 6, 7, 8, \ldots$ лет) крайне мала, в связи с чем для практических целей подсчет можно ограничить определением трех-четырех летних серий. Подобная оценка производится и для подсчета количества многоводных серий при той же расчетной обеспеченности, но с вероятностью, выраженной уже соответственно $(1 - P)$.

Вероятностная оценка оптимальной обеспеченности производится подсчетом вероятности события также из предположения о том, что за каждой маловодной серией последует более длительная или равная по продолжительности серия многоводных лет, с использованием эмпирически оцененного числа многоводных и маловодных периодов в рядах за уровнями подземных вод или подземным стоком. Данная оценка производится отдельно для квантилей обеспеченности (обеспеченность, выраженная в долях единицы) 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9. Используя теорему умножения вероятностей, для каждого квантиля подсчитывается произведение вероятностей появления каждого конкретного числа и длины серии маловодных лет с учетом полученных различных величин многоводных серий. Это произведение вероятностей и отражает суммарную вероятность гарантированности восполнения запасов подземных вод, оцененную по формуле: $P = \frac{n_1}{n_{общ}} \frac{n_2}{n_{общ}}, \ldots, \frac{n_j}{n_{общ}}$; где $n_1\ n_2, \ldots, n_j$ — число маловодных серий длиной m лет, обеспеченных восполнением; $n_{общ}$ — общее число маловодных серий.

Рассмотрим вероятностную оценку оптимальной обеспеченности на рассчитанном Г.И. Семыкиной примере (табл. 6).

Таблица 6. **Теоретический расчет оптимальной обеспеченности**

Квантиль обеспеченности	Длина серий (в числителе), лет и числа серий (в знеменателе)		Вероятностная оценка оптимальной обеспеченности
	маловодных	многоводных	
0,5	1/5, 2/2, 4/1	1/5, 2/2, 3/1	$P=8/8 \cdot 6/8 \cdot 0/8=0$ (0)
0,6	1/5, 4/1	1/2, 2/2, 3/1, 4/1	$P=6/6 \cdot 1/6=0,17$ (17)
0,7	1/2, 2/2	1/2, 4/1, 6/1	$P=4/4 \cdot 2/4=0,5$ (50)
0,8	1/2, 2/1	1/1, 6/1, 11/1	$P=3/3 \cdot 2/3=0,66$ (66)
0,9	1/2	6/1, 14/1	$P=2/2=1$ (100)

Примечание. 1. В правой части выражения вероятностной оценки оптимальной обеспеченности для квентиля обеспеченности равного 0,5: первый множитель — для меловодной серии длиной в 1 год многоводная серия всегда будет равной или большей продолжительности; второй множитель — за двумя маловодными сериями продолжительностью в 2 года могут последовать две многоводные серии меньшей продолжительности, когда число серий, обеспеченных восполнением, равно шести; третий множитель — четырехлетняя маловодная серия в данном примере никогде не может быть обеспечена восполнением, поэтому для нее вероятность равна нулю.

2. В скобках дено P, %.

Сопоставление результатов анализов по выбору оптимальных обеспеченностей восполнения запасов подземных вод эмпирическим и вероятностным путем показало в ряде случаев хорошую их сходимость. В ряде других случаев вероятностные расчеты оказались более "жесткими", снизив расчетную обеспеченность на 5—10 % по сравнению с эмпирической оценкой. Это вполне оправдано, так как при переборе различных сочетаний в теоретических расчетах предусматривается возможность и того, что все маловодные годы могут встретиться подряд. В результате анализа многочисленных длинных рядов конкретных наблюдений было отмечено, что например, при 95%-ной обеспеченности подземного стока продолжительность маловодных серий, как правило, не превышает 1 года, хотя теоретически здесь возможна и пятилетняя маловодная серия. Поэтому выбор оптимальных обеспеченностей восполнения запасов подземных вод можно производить по анализу эмпирических рядов наблюдений.

Аналогичные оценки возможности чередований продолжительностей серий мало- и многоводных лет могут быть выполнены и по гидрогеологическим данным, когда восполнение запасов подземных вод осуществляется за счет речных вод, а также при изучении чередований мало- и многоводных периодов внутри года.

Для анализа закономерностей сезонной изменчивости режима подземных вод достаточно иметь среднемесячные значения по уровням или рас-

ходам подземных вод или расходам поверхностного водотока за многолетие. По ним для каждого месяца в отдельности строятся графики обеспеченности. Используя эти графики, строятся кривые внутригодового распределения уровней различной обеспеченности (от 95 до 50%-ной) и рассчитываются среднегодовые значения для каждого из лет различной обеспеченности (см. рис. 19, *а*). Для практической цели удобнее строить ступенчатый вид графика.

По данному графику можно определить продолжительность маловодных и многоводных периодов восполнения запасов подземных вод для каждого значения обеспеченности (см. рис. 19, *б*).

Принципиально любой водоотбор, равный среднегодовому значению каждой обеспеченности, гарантирован восполнением в пределах года соответствующей водности. Поэтому и в этом случае требуется определить оптимальную обеспеченность, которая устанавливается из совокупности двух оценок:

1) по соотношениям продолжительности и объемов маловодных и многоводных серий аналогичным описанным выше способам (для этого хронологические за многолетие графики режима подземного стока, построенные по среднемесячным данным, разбиваются горизонтальными линиями, соответствующими среднегодовым значениям различной обеспеченности, и по ним определяется оптимальная обеспеченность, при которой после каждой маловодной серии внутри года последует многоводная, большая по продолжительности и объемам);

2) на основе определения емкостных возможностей водоносного горизонта, т. е. его способности обеспечить среднегодовой водоотбор, соответствующий расчетной оптимальной обеспеченности, в течение маловодного периода продолжительностью, соответствующей году данной обеспеченности.

Сопоставление результатов расчетов оптимальных обеспеченностей, выполненных по среднемесячным (или минимальным 30-дневным годовым) значениям и по среднегодовым значениям различной обеспеченности, показывает в целом близкую картину (с более жесткими результатами по минимальным 30-дневным данным).

Обоснование снижения расчетной обеспеченности восполнения с установленных 95 или 90%-ной обеспеченностей до каких-то более низких обеспеченностей (там, где это возможно) позволяет повысить эффективность использования подземных вод месторождений и более обоснованно определить рациональный режим эксплуатации подземных вод внутри года и за многолетие.

Выполненные по СССР оценки оптимальных обеспеченностей показали, что в большинстве случаев наиболее частыми оказались 80%-ные обеспеченности [19]. Распространение их по территории СССР свидетельствует о значительной роли геологического строения и климатических условий в определении сезонной и многолетней изменчивости режима подземных вод, а также и оптимальных обеспеченностей.

Подобные региональные оценки оптимальных обеспеченностей могут использоваться и при региональных оценках прогнозных эксплуатацион-

ных ресурсов подземных вод, в которых ранее использовались лишь модули питания подземных вод 95%-ной обеспеченности. Такие расчеты представляют интерес и при проверочных балансовых расчетах, проводимых параллельно с любыми гидродинамическими расчетами и моделировании при оценках запасов подземных вод.

Все вышеизложенное позволяет считать, что принцип оценки гарантированности восполнения эксплуатационных запасов и прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод может служить основой для научного обоснования устанавливаемых нормативными документами расчетных обеспеченностей водоснабжения для потребителей различных категорий.

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОГО ПИТАНИЯ (ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ) ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Каким бы методом не проводилось определение эксплуатационных запасов подземных вод (гидравлическим, аналитическим или моделированием), контрольным расчетом всегда служит балансовая оценка источников их формирования. Естественное питание или возобновляемые естественные ресурсы подземных вод традиционно определяются двумя способами: а) по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод (Г.Н. Каменский, В.Г. Ткачук, Н.Н. Биндеман, Л.В. Лебедев, К.И. Сычев, В.С. Ковалевский и др.); б) по гидрологическим данным выделяя подземную составляющую из поверхностного стока (Б.И. Куделин, Ф.А. Макаренко, Н.Н. Веригин, В.С. Ковалевский и др).

Для наиболее грубой оценки величин питания подземных вод используются данные по амплитудам сезонных колебаний уровней подземных вод и водоотдаче пород. Расчет средней (из всех имеющихся наблюдений по одиночным скважинам) амплитуды годовых колебаний уровней подземных вод $\Delta h_{ср}$ ведется по формуле

$$\Delta h_{ср} = \frac{\Delta h^1_{ср} F_1 + \Delta h^2_{ср} F_2 + \ldots + \Delta h^n_{ср} \cdot F_n}{F_{сум}},$$

где $\Delta h^1_{ср}, \Delta h^2_{ср}, \ldots, \Delta h^n_{ср}$ — средние амплитуды колебаний уровней для каждого района с различными видами и разновидностями режима; F_1, F_2, ..., F_n — площади таких районов; $F_{сум}$ — суммарная площадь месторождения.

Для более достоверных оценок величин питания подземных вод необходимо провести районирование участка месторождения подземных вод по видам и разновидностям режима подземных вод, затем изучить внутригодовой режим подземных вод в течение двух-трех лет в пределах каждого из выделенных районов, определить амплитуды колебаний уровней подземных вод в них с учетом особенностей граничных условий и рассчитать питание подземных вод по каждому району в отдельности или для всего района в целом, определив сначала средневзвешенную по площадям амплитуду.

Особенности оценки величин сезонного питания подземных вод в зависимости от генетических различий условий формирования режима подземных вод для различных видов режима заключается в следующем.

1. Приречный вид режима подземных вод характеризуется тем, что колебания уровней грунтовых вод приречных зон находятся в тесной зависимости от режима поверхностных вод. При этом с подъемом уровня воды в реке (для зон, где реки дренируют грунтовые воды) происходит их подпор, в результате чего разгрузка подземных вод в этот момент прекращается. Таким образом, только для приречного вида режима амплитуда колебаний уровня грунтовых вод в чистом виде точно характеризует размеры восполнения запасов грунтовых вод на период их питания, т. е. только для приречного вида режима для расчета естественного восполнения запасов подземных вод могут быть взяты непосредственно наблюдавшиеся амплитуды колебаний уровня грунтовых вод.

Во всех остальных случаях необходимо учитывать то, что при подъеме уровня грунтовых вод во время их питания одновременно происходит увеличение и размеров стока этих вод.

2. Террасовый вид режима подземных вод характеризуется сравнительно малыми колебаниями уровней грунтовых вод. Это связано с тем, что развитые в тыловых частях террасы или заболоченные понижения высоких пойм, озера или просто участки с близким от поверхности земли залеганием уровня грунтовых вод как бы стабилизируют колебания уровня грунтовых вод за счет повышенного в этих частях испарения, а также поверхностного сброса излишков воды. Таким образом, участки с террасовым видом режима схематизируются как пласт-полоса с постоянными напорами на границах пласта. В таких условиях размеры оттока грунтовых вод со стороны террас во времени существенно изменяться не могут. Кроме того, при больших мощностях водоносного горизонта, когда амплитуда колебаний уровня грунтовых вод составляет незначительную часть от мощности горизонта, размеры стока могут быть приняты практически постоянными.

Амплитуду колебаний уровня грунтовых вод в данном случае можно с достаточной для практических целей точностью определить при помощи графического приема, предложенного Н.Н. Биндеманом [1]. Для этого по периоду спада уровня, происходящего в условиях отсутствия питания, когда грунтовые воды только расходуются подземным стоком, определяется темп этого спада. При этом предполагается, что темп подземного стока существенно не изменится. Поэтому, продляя графически спад уровня за время питания грунтовых вод Δt, определяют точку А, до которой снизился бы уровень грунтовых вод при отсутствии их питания (рис. 22, *а*). В результате истинная расчетная величина амплитуды подъема уровня Δh_1 отличается от фактически наблюдавшейся амплитуды Δh на величину x. Аналогичным образом определяются амплитуды подъемов уровней и в другие периоды питания грунтовых вод Δh_2, Δh_3, ..., Δh_n, после чего размеры годового восполнения запасов грунтовых вод определяются по формуле

$$Q = \Sigma (\Delta h_1, \Delta h_2, ..., \Delta h_n)\, \mu F, \qquad (4.13)$$

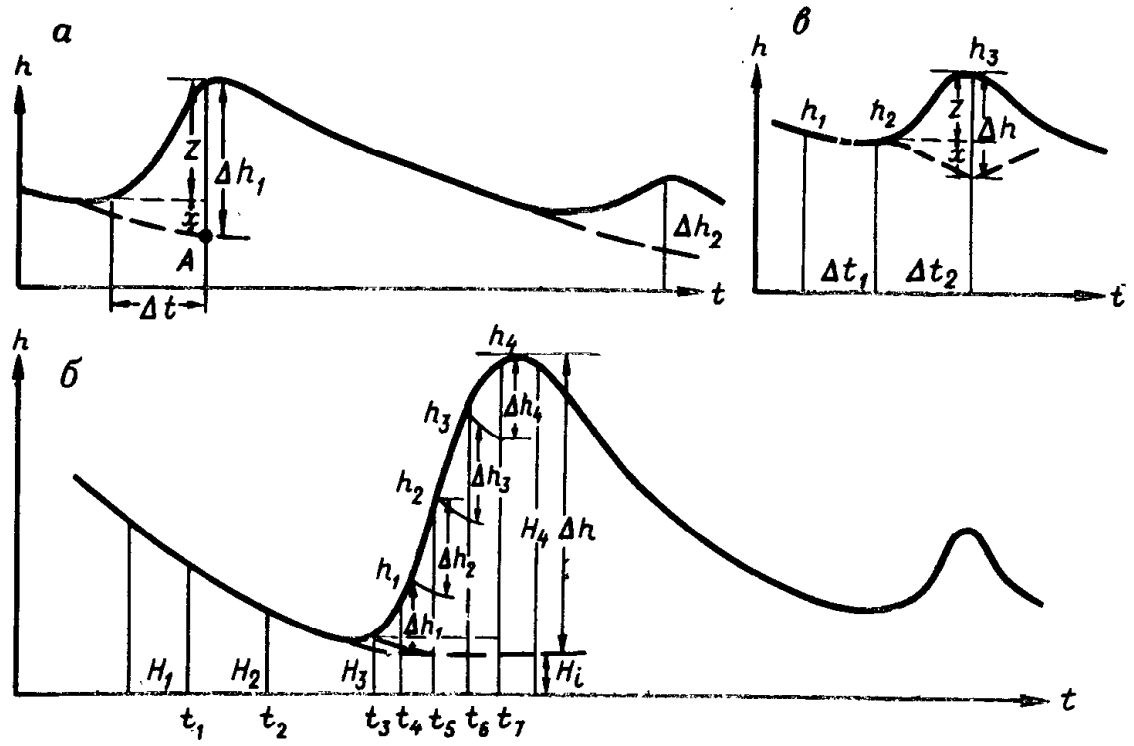


Рис. 22. Схема расчета питания грунтовых вод при террасовом (*а*); склоновом (*б*) и междуречном (*в*) видах режима

где μ — недостаток насыщения пород в зоне аэрации; F — площадь рассматриваемого участка с данным видом режима грунтовых вод.

3. Склоновый вид режима подземных вод характеризуется слабой связью грунтовых вод с атмосферными осадками, которые в условиях сильно расчлененного рельефа расходуются на поверхностный сток. Подъем уровня грунтовых вод склонов происходит в основном за счет подтока транзитных вод со стороны водораздела и иногда за счет разгрузки подземных вод из межпластовых водоносных горизонтов. В результате подъемы и спады уровней грунтовых вод на склонах хорошо коррелируются с таковыми на междуречных пространствах и происходят вслед за ними с определенным отставанием. Разгрузка грунтовых вод на склонах осуществляется в виде источников и скрытых очагов в тыловых частях террас. В том и в другом случае условия формирования режима грунтовых вод на склонах могут быть схематизированы как полуограниченный пласт с постоянным напором на нижней границе. Выход водоносного горизонта на поверхность приводит к тому, что при отсутствии питания идет постоянное снижение уровня грунтовых вод, подчиняющееся закономерности так называемого "независимого" режима, описанного уравнением Майе-Буссинеска для режима расхода источников $Q = Q_0^{-a(t - t_0)}$.

Учитывая, что расход подземных вод определяется в основном мощностью водоносного горизонта, а также то, что уклон потока и фильтрационные свойства горизонта в период его питания меняются несущественно, можно по аналогии написать и другое уравнение

$$H = H_0 e^{-a(t - t_0)},$$

где Q — искомая величина расходов водоносного горизонта на любое время t; Q_0 — известное значение расхода в наблюдавшееся время t_0; H — искомое превышение мощности водоносного горизонта в наблюдательной скважине над уровнем разгрузки подземных вод на любое время t; H_0 — наблюдавшееся превышение мощности водоносного горизонта за время t_0; α — коэффициент истощения определяется для данного водоносного горизонта по любым двум замерам $Q(H_1)$ и $Q(H_2)$ при t_1 и t_2, произведенным в период независимого режима грунтовых вод.

Коэффициент α можно вычислить по формулам:

$$\alpha = \frac{\ln Q_1 - \ln Q_2}{t_2 - t_1}; \qquad (4.\ 14)$$

$$\alpha = \frac{\ln H_1 - \ln H_2}{t_2 - t_1} \qquad (4.\ 15)$$

Например, положения уровня на момент времени t_7, соответствующему максимуму питания (см. рис. 22, *б*) при наличии только одного стока, было бы равно $H_j = H_3 e^{-\alpha (t_7 - t_3)}$, а следовательно, расчетная величина амплитуды подъема уровня $\Delta h = H_4 - H_j$.

Приведенный пример расчета позволяет определить лишь минимальное значение величины амплитуды, так как с подъемом уровня размеры стока также возрастают. Для более точного определения расчетной амплитуды подъема уровня надо время подъема разделить на равные промежутки времени. При этом чем более дробно будет разбит этот отрезок, тем точнее будет результат. Однако для практических целей достаточно выделить лишь четыре отрезка времени и рассчитать для каждого из них амплитуду подъема уровня Δh_j (см. рис. 22, *б*). Суммарная величина амплитуды, таким образом, будет в общем виде равна

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4$$

или при большем числе отрезков времени $\Delta h = \Sigma (\Delta h_1\ \Delta h_2, ..., \Delta h_n)$, где

$$\Delta h_1 = h_1 - H_3 e^{-\alpha (t_4 - t_3)};$$

$$\Delta h_2 = h_2 - h_1 e^{-\alpha (t_5 - t_4)};$$

$$\Delta h_3 = h_3 - h_2 e^{-\alpha (t_6 - t_5)};$$

$$\Delta h_4 = h_4 - h_3 e^{-\alpha (t_7 - t_6)} \text{ и т. д.}$$

Все обозначения ясны из рис. 22, *б*.

4. Междуречный вид режима подземных вод характеризуется тесной связью колебаний уровня грунтовых вод с атмосферными осадками. Условия формирования режима грунтовых вод междуречных пространств могут быть схематизированы как "неограниченный пласт". При равномерном питании грунтовых вод (что может быть принято при сравнительно

однородном геологическом строении участка изысканий и небольших колебаниях глубин залегания грунтовых вод) подъем уровня этих вод во время их питания происходит практически параллельно первоначальным уровням. Уклоны поверхности грунтовых вод I в момент подъема уровня практически не изменяются или изменяются крайне мало. Учитывая, что фильтрационные свойства водоносного горизонта в этот момент также существенно не меняются, становится понятным, что размеры подземного стока в таких условиях практически прямо пропорциональны изменениям мощности водоносного горизонта и зависят лишь от нее. В соответствии с этим, определив в период отсутствия питания размер (или темп) подземного стока как $\frac{h_1 - h_2}{\Delta t_1}$ при средней мощности $h_{ср} = \frac{h_1 + h_2}{2}$ для данного периода, можно затем определять изменения размеров стока при любом положении уровня подземных вод (по прямой зависимости величины стока в метрах от средней мощности водоносного горизонта за любой другой промежуток времени). Амплитуда колебаний уровня грунтовых вод Δh для междуречного вида режима (см. рис. 22, *в*) может быть определена по формуле: $\Delta h = Z + X$, где $X = \frac{(h_1 - h_2)(h_3 + h_2)\Delta t_2}{(h_1 + h_2)\Delta t_1}$.

Определив, таким образом, амплитуды колебаний уровней грунтовых вод и зная водоотдачу (недостаток насыщения) пород, можно рассчитать размеры питания или восполнения подземных вод. Аналогичным образом определив темп спада уровней $\frac{(h_1 - h_2)}{\Delta t_1}$ за какой-то промежуток времени Δt_1, можно определить и среднюю величину годового стока по формуле

$$Y = \frac{2(h_1 - h_2) h_{ср} \cdot_{год} \mu}{\Delta t_1 (h_1 + h_2)}.$$

Зная величину годового питания X, можно по разности приближенно оценить и испарение с поверхности грунтовых вод $E = X - Y$.

Указанные приемы применимы для грунтовых вод, где области распространения и питания подземных вод совпадают. Полученные величины амплитуд по периодам ограниченных во времени наблюдений приводятся затем к искомым многолетним изложенным выше способом. В более сложных условиях оценка баланса подземных вод может осуществляться на основе гидродинамического анализа колебаний уровней подземных вод по серии скважин, расположенных по профилям (по потоку) или конвертам. Методы такого анализа разрабатывались Г.Н. Каменским, А.В. Лебедевым, П.А. Киселевым и широко освещены в литературе [17, 20, 23 и др.].

Изучение естественного восполнения подземных вод по гидрологическим данным позволяет определить суммарную разгрузку подземных вод в реки. Условность отнесения этой разгрузки к естественным ресурсам подземных вод, под которыми обычно понимается обеспеченное питанием

поступление воды в водоносный горизонт в годовом разрезе, заключается в следующем: а) здесь не учитывается испарение с поверхности подземных вод, которое в процессе эксплуатации может быть снято, и питание подземных вод за счет этого увеличиться; б) разгрузка подземных вод в реки осуществляется как из продуктивных, так и непродуктивных водоносных горизонтов, которые практически не будут участвовать в восполнении запасов подземных вод.

Тем не менее на основе анализа гидрологических данных можно достаточно реально оценить суммарное восполнение подземных вод и поэтому данный метод широко применяется для таких целей. В тех случаях, когда для определения естественных ресурсов подземных вод достаточно знать лишь среднегодовые характеристики подземного стока, величины подземного стока оцениваются приближенно на основе расчленения гидрографа рек с учетом процессов берегового регулирования.

Это делается для водоносных горизонтов, имеющих тесную гидравлическую связь с рекой. Для водоносных горизонтов, гидравлически не связанных с рекой, т. е. поведение уровня которых не зависит от стока реки, разгрузка подземных вод в период паводка не прекращается, а, наоборот, увеличивается, так как питание подземных вод в это время возрастает. Разгрузка подземных вод в реку в этом случае выделяется по месяцам путем увеличения минимального меженного зимнего расхода реки q пропорционально коэффициентам K_i, характеризующим отношение типичного или основного для рассматриваемого бассейна среднемесячного дебита Q_i к минимальному в году среднемесячному дебиту этого же источника Q_{min}. Тогда $K_{min} = Q_i/Q_{min} = 1$; $K_I = Q_I/Q_{min}$; $K_{II} = Q_{II}/Q_{min}$; ... $K_{XII} = Q_{XII}/Q_{min} > 1$, где Q_I, Q_{II}, ..., Q_{XII} — среднемесячные дебиты источника. Годовой подземный сток, таким образом, оценивается по формуле

$$Q_e = qK_I + qK_{II} + ... + qK_{XII} = q(K_I + K_{II} + ... + K_{XII}).$$

При разгрузке в реку различных водоносных горизонтов (гидравлически связанных и не связанных с рекой, а также напорных вод) гидрограф реки, как известно, расчленяется соответственно на три части. Для месторождений подземных вод, расположенных в долинах транзитных рек, выходящих за пределы изучаемой территории, разгрузка подземных вод оценивается по разности расходов, замеренных между двумя створами на входе в район и на выходе из него в периоды отсутствия осадков. При невозможности оценить суммарный родниковый сток в пределах всего водосборного бассейна, и тем более изучить его режим, можно приближенно оценить изменчивость подземного стока во времени по данным наблюдений за режимом уровней грунтовых вод или родников за пределами зоны подпора реки. Для этого данные минимум по двум-трем скважинам или родникам представляются в нормированном виде (в процентах обеспеченности) и усредняются по каждому году в отдельности. Пример такой полученной в итоге усреднения обобщенной региональной ха-

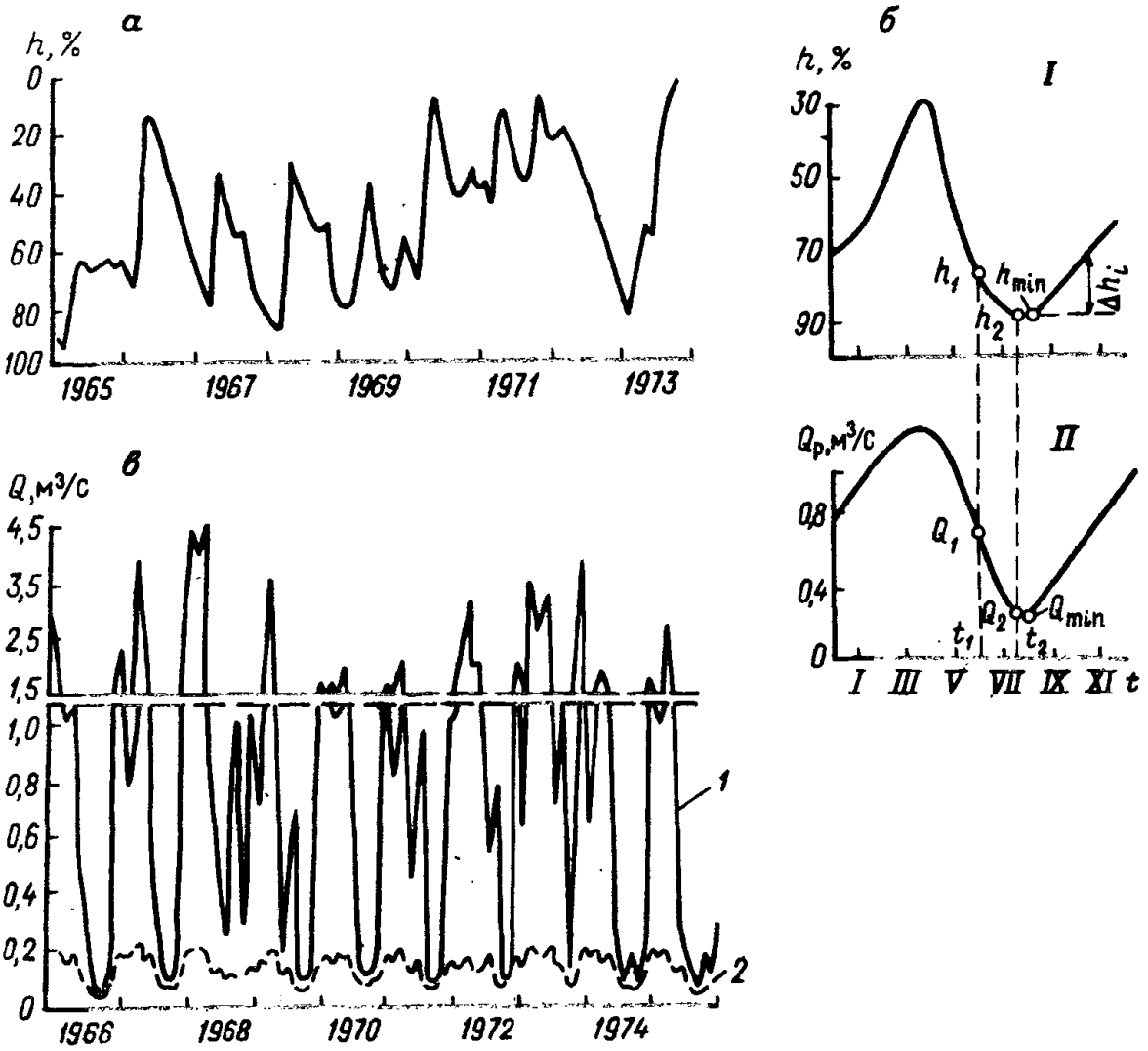


Рис. 23. Схемы определения внутригодового режима подземного стока по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод и расходов реки (на примере бассейна р. Медвенка).

а — обобщенная (в процентах обеспеченности) характеристика режима уровней подземных вод в бассейне; *б* — схема соотношения режима расходов реки (II) и уровней подземных вод (I); *в* — сопоставление режима поверхностного (*1*) и подземного (*2*) стоков

рактеристики режима подземных вод для бассейна р. Медвенка, выполненный по ряду скважин, приведен на рис. 23, *а*. По периоду независимого спада уровней воды в скважинах или дебита родников, а также поверхностного стока в самом маловодном году, когда расход реки заведомо или в подавляющей своей части определяется только разгрузкой подземных вод, оценивается удельный подземный сток. В приведенном примере (см. рис. 23, *б*) изменению расхода реки (ΔQ) соответствует изменение уровней воды в скважинах Δh, выраженных в процентах обеспеченности:

$$\beta = \frac{Q_{1р} - Q_{2р}}{h_1 - h_2} = \frac{\Delta Q}{\Delta h}, \qquad (4.16)$$

где $Q_{1р}$, $Q_{2р}$ — расходы реки на два отрезка времени t_1 и t_2 периода независимого спада; h_1 и h_2 — изменения уровней подземных вод, выраженные в процентах обеспеченности, определяемые по графику для тех же отрезков времени t_1 и t_2.

Зная единицу изменения расхода реки на единицу изменения уровней подземных вод в процентах и режим уровней за год или многолетие (также в процентах), можно рассчитать изменение подземного стока (см. рис. 23, *в*) по формуле: $Q_i = Q_{min} + \Delta h_i \beta$, где Q_{min} — минимальный меженный расход реки; Δh_i — амплитуда колебания уровня подземных вод в процентах для каждого месяца по отношению к h_{min}.

Аналогичным образом можно оценить изменчивость подземного стока по режиму родников, выраженному также в процентах обеспеченности, или по данным одновременно и уровней подземных вод, и дебитов источников.

Выполненные таким способом оценки сезонной и многолетней изменчивости подземного стока показали [19], что и в межень во многие годы поверхностный сток состоит как из собственно поверхностного, так и из подземного стоков. Это подтверждается и изотопными исследованиями. Так, А. Херман и В. Стихлер (ФРГ), изучая режим стабильных изотопов H^2 и O^{18} в поверхностных и подземных водах одного из бассейнов Баварии, установили, что не только в межень, но и в периоды паводков поверхностный сток в значительной мере определяется разгрузкой подземных вод. Таким образом, традиционные на сегодня представления о формировании поверхностного стока в ряде случаев должны быть пересмотрены.

Оцененные тем или иным образом объемы подземного стока характеризуют разгрузку подземных вод с площади всего водосбора речного бассейна выше измеряемого водомерного створа на реке. Поэтому в целях удобства сравнения территорий этот сток обычно пересчитывается в модули или коэффициенты подземного стока. Модуль подземного стока $M_п$ выражает расход подземного стока с 1 км^2 площади (в л/с км^2): $M_п = \frac{1000 \cdot Q_п}{F \cdot 31{,}5 \cdot 10^6}$, а коэффициент подземного стока $K_п$ — отношение объема годового подземного стока к объему годовых осадков $K_п = \frac{Q}{X} \cdot 100\,\%$.

Модули подземного стока используются при установленной площади месторождения для оценки естественных его ресурсов, а также служат критерием для сопоставления с другими разведанными месторождениями-аналогами при обосновании возможности получения тех или иных запасов подземных вод.

Для определения величин естественных ресурсов подземных вод заданной обеспеченности необходимо или выбирать для расчленения гидрографа год соответствующей обеспеченности, или полученные по конкретным двум годам наблюдений величины подземного стока (в объемном или модульном выражении) необходимо пересчитывать на год искомой обеспеченности рекомендованным выше способом.

В районах, где поверхностный сток практически отсутствует (картс, лавовые плато), инфильтрационное питание в отложениях, не содержащих хлоридов, может быть, по А. Шоллеру, определено по соотношению концентраций хлора в подземных водах и атмосферных осадков [44] : $W/p = Cl_p/Cl_п$, где W — инфильтрационное питание; p — количество атмосферных осадков; Cl_p, $Cl_п$ — концентрация хлора в атмосферных осадках и в подземных водах.

Если содержание хлора в атмосферных осадках изменчиво и инерционность водоносного горизонта велика (т. е. расход потока подземных вод интегрирует осадки за длительный период), то Cl_p оценивается по серии дождей p_i, т. е. $Cl_p = \dfrac{Cl_1 p_1 + Cl_2 p_2 + \ldots + Cl_п p_п}{p_1 + p_2 + \ldots + p_п}$.

ОЦЕНКА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Определение гидрогеологических параметров на поисково-разведочных стадиях и при региональных исследованиях производится преимущественно на основе опытно-фильтрационных работ. Достоинством таких работ является возможность в условиях, приближенных к будущей эксплуатации, решить сразу ряд необходимых задач — определить основные расчетные параметры, установить влияние границ пластов, оценить возможную изменчивость качества подземных вод в процессе их эксплуатации, оценить эмпирически возможную производительность скважин и т. д. Однако возможности этого вида гидрогеологических исследований тоже ограничены прежде всего из-за ограниченности их продолжительности. Поэтому опытные работы следует дополнять анализом данных режима подземных вод и в том числе в плане корректур или получения расчетных параметров. Особенно перспективны оценки пьезо- или уровнепроводности пластов по данным наблюдений за перераспределением напоров в водоносном горизонте под влиянием паводков или через барометрическую эффективность пластов, т. е. по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод и атмосферного давления. Сущность последнего явления сводится к тому, что с увеличением атмосферного давления уровни воды в скважинах и дебиты источников снижаются, а с уменьшением — повышаются. Указанные изменения связываются с упругими свойствами воды и пласта, так как увеличение давления на водоносный горизонт ΔP приводит к сжатию подземных вод и пород, в результате чего уровни подземных вод снижаются и, как следствие этого, уменьшаются дебиты источников, так как они прямо пропорциональны мощностям водоносного горизонта.

Отношение изменений уровня подземных вод ΔH, вызванное соответствующими изменениями атмосферного давления ΔP, есть барометрическая эффективность $\beta = \dfrac{\Delta H \gamma}{\Delta P}$, где γ — объемный вес подземных вод, равный для пресных вод 1 г/см^3.

Барометрическая эффективность для различных пластов измеряется величинами 0,2—0,8 и может рассматриваться как гидрогеологический параметр водоносного горизонта, характеризующий упругие свойства этого горизонта и степень изоляции его от атмосферы. Периодическое его определение может служить критерием ухудшения реакции скважины на изменения напоров в горизонте за счет зарастания фильтра. Определение барометрической эффективности дает возможность получить гидрогеологические параметры, непосредственно входящие в гидрогеологические расчеты (коэффициент упругоемкости водоносного пласта, коэффициент пьезопроводности). Предположим, что давление передается равномерно на все пласты и заключенные в них водоносные горизонты. В зависимости от знака изменения давления водоносные горизонты сжимаются или расширяются с амплитудами, достигающими 20—25 см, но никакого горизонтального перемещения частиц воды в водоносном горизонте под воздействием этих изменений не происходит. Изменения объема воды $\pi r^2 \Delta h$ в скважине в этом случае могут быть вызваны сжатием воды и пород в элементарном столбце площадью πr^2. Во всех последующих расчетах можно оперировать лишь линейными единицами измерения атмосферного давления Δp и напора водоносного горизонта Δh, отнесенных к единице площади.

В общем виде изменения объема ΔV и уровня воды Δh в скважине под влиянием атмосферного давления выражаются формулами:

$$\Delta V = \pi r^2 \Delta h = [\beta_w (hr^2 H + \pi r^2 \alpha) + \beta_s (\pi r^2 m)] \Delta p;$$

$$\Delta h = [\beta_w (H + m\alpha) + \beta_s m] \Delta p,$$

где r — радиус скважины; β_w и β_s — коэффициенты упругоемкости воды и пласта (скелета пород водоносного горизонта); H — высота столба воды в скважине; α — пористость пласта; m — мощность водоносного горизонта.

Исходя из равномерной передачи давления на весь водоносный горизонт, Ч. Джекоб вывел следующую формулу для выражения барометрической эффективности:

$$B = \frac{aE_s}{aE_s + E_w}, \qquad (4.17)$$

где $E_s = 1/\beta_s$ — модуль упругого сжатия пласта или скелета пород водоносного горизонта; $E_w = 1/\beta_w$ — модуль упругого сжатия воды.

Определив по данным режимных наблюдений барометрическую эффективность и зная модуль упругого сжатия воды E_w, из уравнения (4.17) можно определить модуль упругого сжатия скелета пород водоносного горизонта

$$E_s = \frac{BE_w}{\alpha (1 - B)}, \qquad (4.18)$$

а затем коэффициенты упругоемкости водоносного горизонта β^* и упругой водоотдачи пласта $\mu^* = \beta^* m$

$$\beta^* = \beta_s + \alpha\beta_w = \frac{a}{E_w} + \frac{1}{E_s} = \frac{a}{BE_w};$$

Зная коэффициент фильтрации k и коэффициент упругоемкости пласта β^*, можно определить коэффициент пьезопроводности

$$a = \frac{k}{\beta^*} = \frac{kBE_w}{a}.$$

Многочисленные определения показывают, что полученный таким способом коэффициент пьезопроводности в изолированных пластах хорошо сопоставляется с полученным по опытным откачкам. Там же, где имеет место перетекание, коэффициент пьезопроводности оказывается больше, а упругая водоотдача меньше, чем по опытным работам. Поэтому такое сопоставление может служить критерием для оценки граничных условий, в которых будет работать водозабор. Точность оценок a и μ^* по барометрической эффективности, даже если задаться табличными значениями пористости, которые для определенных типов пород варьируют в незначительных пределах, оказывается достаточно высокой.

Для установления барометрической эффективности водоносного горизонта необходимо, чтобы наблюдательные скважины были снабжены самописцами. Даже в этом случае не всегда с достаточной точностью можно уловить начало изменений в режиме уровня подземных вод по лимнограмме, связанных с началом изменений атмосферного давления по барограмме. Поэтому для исключения случайностей все измеренные изменения уровней от изменений давления наносятся на графики связи $\Delta h = f(\Delta p)$, усредняются прямой, по которой величина B определяется как тангенс угла этой прямой.

Определение расчетных параметров по скоростям развития подпора в зоне влияния паводков рассматривалось Н.Н. Биндеманом, Л.В. Лебедевым, П.А. Киселевым, В.М. Шестаковым и др. Этот метод позволяет оценить параметры для отдельных участков от сечения к сечению между наблюдательными скважинами и изучить тем самым фильтрационную неоднородность пластов. Кроме того, он позволяет определить обобщенные параметры для наиболее развитых в долинах рек сложных слоистых толщ в условиях, близких к расчетным (развитие подпора и подтопления от рек или водохранилищ, фильтрация к водозаборным скважинам).

Для определения расчетных параметров при сравнительно однородном строении достаточно иметь на участке водозабора один-два створа скважин перпендикулярных к реке с минимум двумя скважинами в створе — скв. 1 у реки или вблизи воды в паводок, а скв. 2 — на расстоянии x от первой. Расчет уровне- или пьезопроводности, по В.М. Шестакову, если скорость подъема уровня в граничном пьезометре сохраняется примерно постоянной, можно провести по уравнению

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} = e^{-\lambda^2} - \sqrt{\pi}\,\mathrm{erfc}\,\lambda,$$

где $\lambda = \frac{x}{2\sqrt{at}}$, откуда $a = \frac{x}{4\lambda^2 t}$; t — время, за которое произошли изменения в уровнях в скв. 1 на ΔH_1, а в скв. 2 — на ΔH_2 (от начала заметного подъема или спада уровней в граничном пьезометре в скв. 2).

Время t лучше всего начать отсчитывать от начала заметного подъема уровня воды в граничном пьезометре и до пика подъема уровня в нем.

Значения $\lambda = f(\frac{\Delta H_2}{\Delta H_1})$ определяются по величине отношения.

$\Delta H_2/\Delta H_1$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
λ	0	0,055	0,115	0,18	0,26	0,35	0,44	0,57	0,71	0,95

Принимая во внимание, что водоотдача аллювиальных отложений изменяется от 0,1 до 0,25, определив уровнепроводность, можно найти водопроводимость отложений $T = kh_{ср} = a\mu$, а зная по данным бурения мощность отложений, определить и коэффициент фильтрации.

По взаимосвязи колебаний уровней подземных вод и уровня моря во время приливов и отливов может быть определен коэффициент пьезопроводности. Распространение закономерных и практически равных по величине гармонических колебаний пьезометрического уровня подземных вод под влиянием приливов и отливов определяется по уравнению Форхгеймера

$$h_x = h_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{at_0}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0} - x\sqrt{\frac{\pi}{at_0}}\right), \qquad (4.19)$$

где h_x — половина амплитуды колебаний уровня подземных вод на расстоянии x от моря в момент времени t от начала подъема уровня; h_0 — половина амплитуды колебаний уровня моря в период максимального подъема или спада (по отношению к среднему уровню); t_0 — период прилива.

Максимальная амплитуда колебаний уровня подземных вод на расстоянии x от моря может быть выражена по формуле

$$h_{max} = h_0 e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{at_0}}}, \qquad (4.20)$$

а время отставания максимума уровня подземных вод в наблюдательной скважине (t_{max}) по отношению ко времени максимума уровня моря

$$t_{max} = x\sqrt{\frac{t_0}{4\pi a}}. \qquad (4.21)$$

Отсюда коэффициент пьезопроводности определяется по формуле

$$a = \frac{x^2 t_0}{4\pi t^2_{max}} \quad \text{или} \quad a = \frac{\pi x^2}{t_0 \left(\ln \frac{h_0}{h_{max}}\right)^2} \qquad (4.22)$$

Ввиду того, что часто расстояние выхода напорного пласта в море x неизвестно, за амплитуду колебания моря может быть принята амплитуда колебаний пьезометрического уровня в ближайшей к морю скважине. Тогда расстояние x будет соответствовать расстоянию между скважинами, а время t_{max} также должно отсчитываться от времени наступления максимума уровня в первой от моря скважине.

Определив, таким образом, коэффициент пьезопроводности по тем же формулам (4.21), (4.22), можно затем при однородном строении пласта рассчитать действительное расстояние x его выхода в море.

Водоотдача пород (при снижении уровней) или недостаток насыщения пород в зоне колебаний уровня грунтовых вод (при повышении уровня) могут быть определены по уравнению Г.Н. Каменского в конечных разностях при наличии трех наблюдательных скважин. Так, при спаде уровня в зимнее время, когда инфильтрация W = 0, водоотдача пород в зоне колебаний уровня может быть определена по формуле

$$\mu = \frac{K \Delta t}{2 \Delta x^2 (H_2 - H_2')} (h_1 + h_2)(H_1 - H_2) - (h_2 + h_3)(H_2 - H_3), \qquad (4.23)$$

где все обозначения приведены на рис. 24.

При разных расстояниях между скважинами l_{1-2} и l_{2-3} данное уравнение может быть выражено в виде

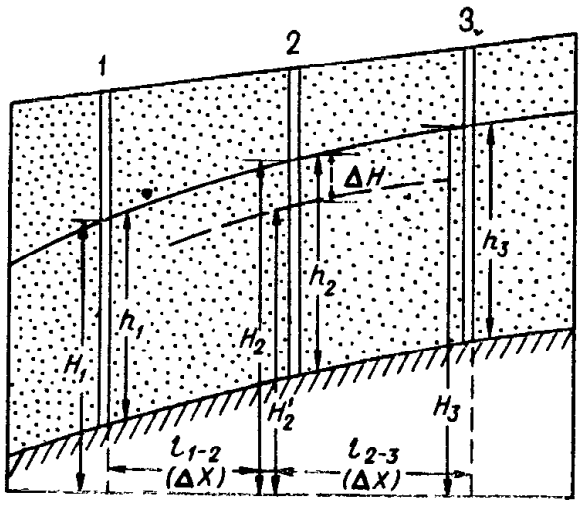


Рис. 24. Схема для расчета водоотдачи пород.

1 — водонасыщенные породы; *2* — водоупор; *3* — скважина и ее номер

$$\mu = \frac{2k\Delta t}{\Delta H (l_{1-2} + l_{2-3})} \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \cdot \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} - \frac{h_2 + h_3}{2} \cdot \frac{H_2 - H_3}{l_{2-3}} \right).$$

При горизонтальном водоупоре это уравнение принимает более простой вид

$$\mu = \frac{2k\Delta t}{\Delta H (l_{1-2} + l_{2-3})} \left(\frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_{1-2}} - \frac{h_2^2 - h_3^2}{2l_{2-3}} \right).$$

Следует, однако, отметить, что результаты расчетов водоотдачи данным методом зависят от точности определения истинного значения коэффициента фильтрации.

Определить водоотдачу и уровнепроводность пород можно также по данным наблюдений за режимом источников и уровней грунтовых вод в период их независимого спада (или упорядоченного режима), т. е. в период отсутствия питания, используя для этого известные уравнения Майе-Буссинеска. Для ламинарного потока и для случаев, когда мощность водоносного горизонта достаточно велика и ее изменением можно пренебречь, то $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$, а когда мощность соизмерима с ее изменениями $Q_t = \frac{Q_0}{(1 - \alpha t)^2}$, где Q_t — дебит родника на любой момент независимо от режима; Q_0 — дебит родника в начальный момент его спада; α — коэффициент истощения; t — продолжительность спада дебита.

Коэффициент истощения и уровнепроводность пласта в первом случае определяются по формулам:

$$\alpha = \frac{\pi k h_{ср}}{4\mu L^2} = 0{,}78 \frac{a}{L^2}; \qquad (4.24)$$

$$a = 1{,}33\,\alpha \cdot L^2, \qquad (4.25)$$

а во втором — по формулам:

$$\alpha = 5{,}772 \frac{kf}{4\mu L^3} = 1{,}44 \frac{a}{L^3}; \qquad (4.26)$$

$$a = 0{,}69\,\alpha L^2, \qquad (4.27)$$

где k — коэффициент фильтрации; $h_{ср}$ — средняя мощность водоносного горизонта; μ — водоотдача пород; f — площадь вертикального сечения потока грунтовых вод от места выхода родника до водораздела ($f = h_{ср} L$); L — расстояние от родника до водораздела.

Для турбулентного потока расчетная формула (по А. Шоллеру) имеет более сложный вид

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 - \alpha t)^3}, \qquad (4.28)$$

где $\alpha = b \frac{kV^{1/2}}{\mu^{3/2} L^2}$. (4.29)

где V — объем водоносного горизонта от выхода родника до водораздела; b — коэффициент, зависящий от ширины потока.

При сравнительно малой площади зоны дренирования родника $S_р$ по отношению к площади распространения водоносного горизонта $S_г$ коэффициент $b = S_р/S_г$.

Для уровней грунтовых вод, в условиях их независимого спада по аналогии, уравнение примет вид

$$H_t = H_0 e^{-at}, \qquad (4.30)$$

где H_0 — дренируемая мощность потока грунтовых вод (т. е. над базисом дренирования) во время t_0; H_t — дренируемая мощность на любое время t периода спада уровней.

Если мощность горизонта трудно определима, то расчет можно проводить в амплитудах $\Delta \mp H_0 - H$, т. е. $\frac{\Delta}{\Delta_1} = \frac{1 - e^{-at}}{1 - e^{-at_1}}$, откуда $\log\Delta_- - \log\Delta_1 = \log(1 - e^{-at}) - \log(1 - e^{-at_1})$.

Коэффициент истощения оценивается по наблюдаемому начальному периоду спада уровня (или дебита источника) по формулам (4.14), (4.15).

Определив коэффициент истощения и установив по гидрогеологическим или гипсометрическим картам величину L, можно по формулам (4.24) — (4.27) рассчитать коэффициент уровнепроводности. Правильность полученного коэффициента α можно проверить по формулам (4.14), (4.15) или сопоставив расчетные кривые с фактическими. При известных средних мощностях горизонта из полученных значений определяют величину k/μ. Если можно определить водоотдачу по периоду спада, как было показано выше, или задаться величиной водоотдачи, которая изменяется для определенных типов отложений в нешироких пределах, то можно найти и величину k.

В условиях наличия плоского симметричного потока в реку с двух ее сторон, имея наблюдения за режимом уровней грунтовых вод и расходами реки, основные усредненные для участка водозабора расчетные параметры могут быть приближенно определены по периоду независимого спада уровней

$$T = \frac{qL}{2\Delta h} \quad \text{или} \quad T = \frac{qx}{2\Delta h_x}, \qquad (4.31)$$

где $q = \frac{Q_2 - Q_1}{\lambda}$ — приращение расхода между двумя, расположенными на расстоянии λ, гидрометрическими створами на момент времени t; L — расстояние от реки до водораздела грунтовых вод; Δh — превышение уровня подземных вод на водоразделе над урезом реки в момент времени t в период независимого спада уровней; Δh_x — превышение уровня подземных вод в любой скважине над уровнем воды в реке, расположенной на расстоянии x от реки.

Такую скважину лучше всего разместить за пределами зоны влияния несовершенного вреза и сопротивления ложа реки на пьезометрическую поверхность подземных вод, т. е. как можно дальше от реки, но в пределах участка водозабора. Определение T по уравнению (4.31) справедливо или для напорных условий, или в случаях, когда амплитуды колебаний уровней грунтовых вод незначительны по сравнению с мощностью их потока.

Определив коэффициент истощения по формулам (4.14), (4.15) и используя выражения (4.24), (4.25) и (4.31), можно найти водоотдачу пород

$$\mu = \frac{\pi^2 T}{L^2 a} = \frac{\pi^2 q}{2L a \Delta h} = 4{,}93 \frac{q}{a \Delta h L}. \qquad (4.32)$$

Инфильтационное питание при этом приближенно оценивается по формуле

$$W = \frac{q_0 \Delta t_n}{2L \Delta t_ц}, \qquad (4.33)$$

где q_0 — приращение расхода между двумя гидрометрическими створами на начальный момент независимого спада уровней; Δt_n — период питания, определяемый по графикам режима уровней грунтовых вод от начала их подъема до начала независимого спада; $\Delta t_ц$ — период одного гидрогеологического цикла восполнения от начала питания до конца независимого спада уровней, т. е. до очередного периода питания.

Если в течение года имеет место один цикл питания, то полученная таким образом величина W характеризует суммарное годовое питание водоносного горизонта. Если же в течение года возникает два-три периода естественного питания подземных вод, то величины его определяются по формуле (4.33) для каждого из таких периодов в отдельности, а затем суммируются. Инфильтрационное питание может быть также определено по формуле (4.13), где Δh_j — амплитуда подъема уровней грунтовых вод в периоды питания, а μ — водоотдача, определенная по формуле (4.32).

Коэффициент уровне- или пьезопроводности пласта определяется по формуле

$$a = \frac{aL^2}{\pi^2} = 0{,}1aL^2. \qquad (4.34)$$

А.И. Арбузовым доказано, что в период независимого режима снижение уровней и расходов подземных вод осуществляется так же, как в однородном пласте даже при значительной фильтрационной неоднородности водоносного горизонта. Это позволяет использовать данный прием для получения усредненных по водоносному горизонту расчетных параметров. Момент времени t, на который производятся или выбираются для анализа замеры Δh, Δh_x, Q_1 и Q_2 при постоянном для всего периода истощения коэффициенте α, может выбираться на любом отрезке времени в период независимого режима. При закономерном изменении коэффициента α, связанном с осушением сначала крупных каналов и трещин, а затем мелких трещин и пор, момент времени t для определения расчетной величины водопроводимости лучше выбрать на последнем отрезке истощения. Для этого предварительно строится график $\lg h - t$, на котором при наличии двойной или тройной пористости выделятся соответственно два-три разделенных четкими перегибами прямолинейных участка. Для определения водоотдачи и инфильтрационного питания лучше выбирать момент времени t в пределах первого прямолинейного отрезка.

Следует обратить внимание на то, что точность определения ряда параметров данным способом зависит от точности определения местоположения водораздела подземных вод. Для этого целесообразно иметь створ скважин, пересекающих морфологический водораздел, по данным которого графически или расчетом можно установить водораздел подземных вод с достаточной для расчетов параметров точностью.

ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РУСЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Наблюдения за режимом подземных вод используются для установления характера граничных условий пластов. Наибольшее распространение получило использование данных режимных наблюдений для изучения степени гидравлической связи поверхностных и подземных вод в форме учета дополнительного сопротивления русловых отложений ΔL, характеризующего в сумме и сопротивление заиленного слоя и несовершенство вреза реки. Этот параметр можно определить двумя методами.

1. В естественных условиях при однородном строении горизонта и постоянном уклоне потока величина ΔL может быть определена по формуле В.М. Шестакова (для створа, состоящего из двух скважин, расположенных вблизи реки по потоку грунтовых вод при установившемся режиме фильтрации)

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_p}{H_2 - H_1}(x_2 - x_1) - x_1,$$

где H_1 — мощность или уровень подземных вод водоносного горизонта в ближайшей к реке скважине; H_p — мощность водоносного горизонта на урезе реки; H_2 — мощность водоносного горизонта во второй от реки скважине; x_1 — расстояние скв. 1 от реки; x_2 — расстояние скв. 2 от реки.

2. В.М. Шестаков предложил метод определения сопротивления русла реки ΔL и для неустановившегося режима фильтрации, имеющего место во время паводка на этапе подъема или спада уровней. Исходя из параболической зависимости изменений уровня в реке, т. е. $\Delta H_р = a\sqrt{t}$, где a — коэффициент пропорциональности, и зная отношение изменений мощностей водоносного горизонта в наблюдательной скважине и в реке $\frac{\Delta H_{скв}}{\Delta H_р}$, ΔL можно определить из уравнения $\frac{\Delta H_с}{\Delta H_р} = 1 - e^2 \cdot \operatorname{erfc}\tau$, где $\tau = \frac{\sqrt{at}}{x + \Delta L}$, следовательно $\Delta L = \frac{\sqrt{at}}{\tau} - x$, где x — расстояние скважины до уреза реки; t — время, за которое были отмечены изменения уровней в реке и в скважине соответственно на $\Delta H_р$ и $\Delta H_с$ от начала заметного подъема или спада уровня воды в реке; a — коэффициент уровнепроводности пласта.

Величина $\tau = f(\frac{\Delta H_с}{\Delta H_р})$ определяется в зависимости от соотношения уровней $\frac{\Delta H_с}{\Delta H_р}$:

$\frac{\Delta H_с}{\Delta H_р}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,80
τ	0,096	0,214	0,36	0,53	0,77	1,11	1,34	1,65	52,07	2,69

Значения $\Delta H_с$ и $\Delta H_р$ лучше всего принять на период пика паводка от его начала, т. е. в период наиболее контрастных изменений уровней поверхностных и связанных с ними подземных вод. Определив значения ΔL, можно затем рассчитать коэффициенты сопротивления заиленного слоя A_0 и перетекания A по предложенным Ф.М. Бочевером зависимостям:
а) при симметричной схеме фильтрационного потока, т. е. когда понижение при эксплуатации не проявится на противоположном берегу, разгрузка подземных вод сохраняется с двух берегов реки:

$$\Delta L = \sqrt{kmA_0}\ \operatorname{cth}\frac{2b}{\sqrt{kmA_0}} = \frac{\operatorname{cth}(2bA)}{A};$$

б) при одностороннем движении потока

$$\Delta L = \sqrt{kmA_0}\ \operatorname{cth}\frac{2b}{\sqrt{kmA_0}} = \frac{\operatorname{cth}(2bA)}{A},$$

где b — половина ширины русла реки.

$$A_0 = \frac{m_0}{k_0}; \qquad A = \frac{1}{A_0 km},$$

где k_0 и m_0 — вертикальный коэффициент фильтрации и мощность заиленного слоя в русле реки; km — водопроводимость оцениваемого водоносного горизонта.

При многослойном строении отложений отделяющих русло реки от исследуемого водоносного горизонта [4] рекомендуют определять суммарно эффект всех этих слоев комплексным параметром

$$A_z = \frac{m_0}{k_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{m_i}{k_i},$$

где m_i и k_i — мощности и коэффициенты фильтрации каждого из разделяющих слоев.

Определив A и A_0, можно рассчитать условия сохранения подпертого режима или отрыва уровней подземных вод от реки при работе будущего водозабора, а следовательно, обосновать расчетную схему для оценки эксплуатационных запасов подземных вод с границей первого рода ($H = \text{const}$) или с границей третьего рода (с дождеванием). Условия отрыва или сохранения подпертого режима обоснованы в ряде работ [28 и др.] для различных гидрогеологических условий. Однако в наиболее общем виде условие сохранения подпертого режима определяется условием превышения возможного поглощения речных вод над производительностью водозабора, т. е. $Q < \left(\frac{H_0 - m}{A_0}\right) 2bL$, где L — зона влияния водозабора вдоль реки (или с запасом — длина водозаборного ряда).

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОД ВЛИЯНИЕМ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Оценка размеров питания подземных вод на участке водозабора или в зоне его влияния одним из указанных выше методов еще не достаточна для суждения об обеспеченности эксплуатационных запасов подземных вод восполнением. Это связано с тем, что эксплуатация подземных вод вызывает изменение соотношений объемов питания и разгрузки, т. е. приводит к изменению их баланса. При этом следовало бы отметить, что нельзя считать правильным бытующее иногда представление о том, что имеющее место естественное питание водоносного горизонта автоматически учитывается в используемых для гидродинамических расчетов запасов подземных вод уровнях и поэтому может не приниматься во внимание. Эксплуатация может существенно изменить баланс подземных вод, и исходные уровни, от которых будет отсчитываться понижение уже не будут учитывать вновь сложившихся условий питания подземных вод. Эти изменения могут и улучшить и ухудшить условия питания подземных вод.

В соответствии с этим задачей режимных исследований является не только определение размеров естественного питания подземных вод, но и прогноз изменений их питания в процессе эксплуатации.

Как известно, при снижении уровня грунтовых вод, а следовательно, при увеличении мощности зоны аэрации размеры испарения с поверхности грунтовых вод уменьшаются. Одновременно уменьшаются и размеры инфильтрации атмосферных осадков, т. е. питание подземных вод. Этот процесс довольно полно изучен для ряда районов страны А.В. Лебедевым. Исследования показали, что во всех случаях питание $+W\Delta t$ и испарение $E\Delta t$ с глубиной уменьшаются. При этом чаще всего испарение уменьшается интенсивнее, чем питание (рис. 25). Следовательно, до каких-то определенных глубин снижение уровня грунтовых вод под влиянием водоотбора приводит к некоторому увеличению размеров питания, а затем к его снижению. Этот процесс особенно значителен в районах с неглубоко залегающими грунтовыми водами от поверхности земли (заболоченным массивам, лиманам и т. п.), особенно в аридной зоне.

В задачу режимных наблюдений входят определение глубин, до которых питание подземных вод увеличивается, и оценка размеров возможного увеличения питания подземных вод на первом этапе эксплуатации, а также установление размеров дальнейшего уменьшения питания при последующем снижении уровней подземных вод в процессе их длительной эксплуатации.

Зависимость изменения питания от глубины залегания уровня грунтовых вод имеет гиперболический вид. Спрямить кривые можно путем построения графиков $\lg\Delta H = f(\lg z)$. По этим графикам, экстраполируя глубины залегания грунтовых вод в соответствии с расчетными понижениями

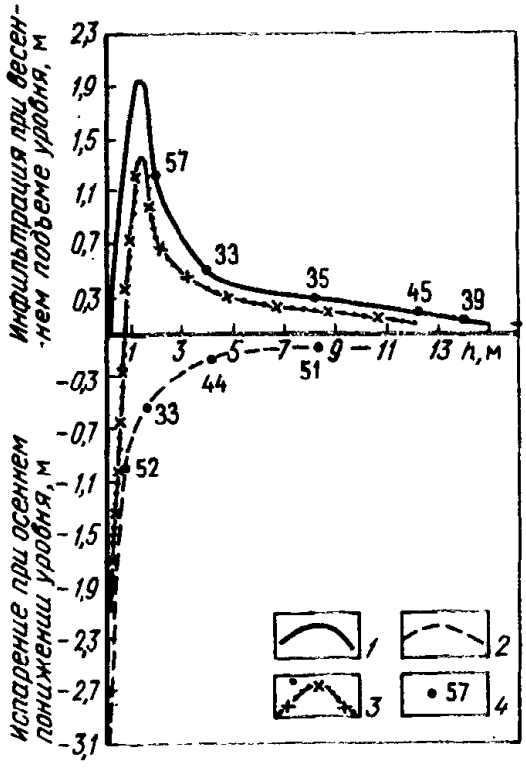
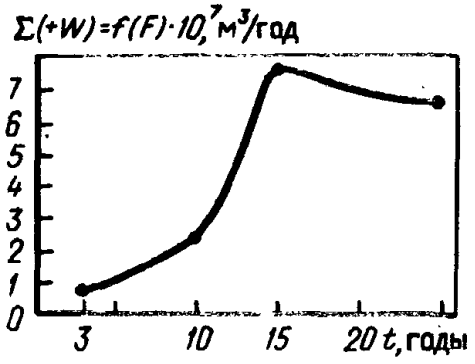


Рис. 25. График зависимости величины питания грунтовых вод от глубины их залегания.

Кривые инфильтрации: *1* — испарения; *2* — результирующего питания; *3* — грунтовых вод; *4* — скважина и ее номер

Рис. 26. График зависимости изменения размеров естественного питания подземных вод в пределах воронки депрессии по мере ее развития во времени



уровней на разные периоды эксплуатации и продляя прямую линию графика, можно получить величины измененного питания грунтовых вод.

Для построения графика изменений питания и испарения с глубиной необходимо в пределах участка изысканий подобрать несколько скважин с различными глубинами залегания среднегодовых уровней грунтовых вод (например, 0,5; 1,0; 1,5; 2; 3; 5; 10; 15 м).

Графики зависимости изменений питания грунтовых вод с глубиной могут быть построены по данным, имеющимся в районах лизиметрических наблюдений или по материалам гидродинамического анализа данных наблюдений за режимом подземных вод. Зависимость амплитуд колебаний уровней грунтовых вод от глубины является основой для прогнозов изменений питания во времени.

Установив зависимость изменения амплитуд уровня от глубины и спрямив график этой зависимости путем построения графиков типа $\lg H = f(\lg z)$, можно по ним экстраполировать указанные зависимости до необходимых глубин.

Путем последовательного вычитания величин испарения — W из величины инфильтрации + W строится результирующий график размеров питания подземных вод в зависимости от глубины их залегания.

На рис. 26 показан график изменения размеров питания подземных вод во времени, рассчитанный таким путем для одного из водозаборов, Как видно из этого графика, несмотря на то что с увеличением глубины залегания уровней размеры питания грунтовых вод уменьшаются, в целом в условиях постоянно расширяющейся воронки депрессии суммарное питание сначала растет, так как быстро растет площадь воронки и, следовательно, увеличивается площадь ее водосбора, и лишь через 15 лет от начала эксплуатации питание начинает уменьшаться.

Дополнительное увеличение восполнения запасов подземных вод за счет снятия испарения может быть оценено по формуле С.Ф. Аверьянова

$$E = E_0 (1 - y/y_{кр})^{\xi},$$

где E и E_0 — соответственно испарение с поверхности грунтовых вод и испаряемость с водной поверхности; y — глубина залегания грунтовых вод; $y_{кр}$ — критическая глубина, с которой испарение практически не происходит.

Показатель степени ξ, по С.Ф. Аверьянову, может изменяться от 1 до 3, но обычно там, где имеет место и испарение и транспирация, принимается равным 1. В качестве критической глубины в аридной зоне можно принять 5—6 м, в гумидной 4—5 м. Для определения площадей, в пределах которых возможно снятие испарения, необходимо иметь карты глубин залегания уровней грунтовых вод на период до эксплуатации и при водоотборе. Особенно существенным может оказаться учет снятия испарения в долинах рек, где в тыловых частях низких террас и поймы на испарение расходуется значительная (иногда до 60 %) часть разгружающихся здесь подземных вод. Изменения величин питания подземных вод должны быть соответственно прибавлены или вычтены из определенных расчетных

минимальных уровней (мощностей) водоносных горизонтов, от которых отсчитываются допустимые понижения при расчетах эксплуатационных запасов подземных вод.

Глава 5
МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ВОДОЗАБОРОВ

Изучение и анализ опыта эксплуатации на действующих водозаборах невозможно переоценить, так как в отличие от кратковременных опытно-фильтрационных работ в процессе длительного водоотбора можно:

— оценить усредненные для всех или большей части воронки депрессии расчетные параметры с учетом реальной фильтрационной неоднородности водоносного горизонта;

— охарактеризовать реальную роль граничных условий, включая те, которые практически не могли проявить себя при опытных работах (перетекание, отжатие воды из глин, удаленные границы и др.) или вообще не существовали до начала эксплуатации (инфильтрационные бассейны при искусственном восполнении, кальмотаж пород под влиянием эксплуатации и т. д.);

— установить в сложных гидрогеологических условиях реальную зависимость дебитов от понижений, которая служит основой гидравлических расчетов (по экстраполяции установленных зависимостей);

— изучить изменчивость источников формирования запасов подземных вод с учетом закономерностей режима поверхностных и подземных вод;

— уточнить эксплуатационные запасы подземных вод с учетом реального режима водоотбора, усредненных или обобщенных параметров, граничных условий и режима восполнения и на этой основе обосновать возможность наращивания или ограничения водоотбора, целесообразность постановки новых изысканий для удовлетворения заявленных перспективных потребностей в воде;

— определить эксплуатационные модули подземных вод, по которым для аналогичных гидрогеологических условий можно оценить достоверность полученных расчетных параметров и принятых расчетных схем (методом аналогии);

— уточнить в конкретных природных условиях прогнозы изменения качества подземных вод, влияния эксплуатации на окружающую среду.

Наряду с этим следует отметить, что анализ режима подземных вод в зонах влияния водозаборов осложнен, как правило, незакономерным режимом эксплуатации, что не позволяет во многих случаях в полной мере использовать существующие методы гидрогеологических расчетов. Водоотбор меняется в многолетнем разрезе, по сезонам года, в течение дней недели и даже внутри суток. Законы этой изменчивости различны не только для разных водозаборов, но и для каждого из них в отдельности. Расходы водоотбора могут, например, расти линейно, по логарифмичес-

кой зависимости, синусоидально, ступенчато и в комбинации этих законов. Количество эксплуатационных скважин может меняться во времени, они могут перераспределяться в пространстве, площадные схемы расположения скважин могут превращаться в линейные, размеры "больших колодцев" — расти во времени. В дополнение к этому нередко отсутствуют необходимые наблюдения за уровнями, водоотбором по всем скважинам, водоотбор не измеряется, а рассчитывается по времени работы насосов или расходу электроэнергии, не ведутся наблюдения за режимом поверхностных вод в районах водозаборов инфильтрационного типа и т. д.

Все это вынуждает прибегать к разного рода обобщениям и усреднениям, что, безусловно, снижает качество результатов анализа. Тем не менее такие исследования важны и во многих случаях могут вполне удовлетворить запросы практики и, в частности, решить сформулированные выше задачи, стоящие перед такими исследованиями. Рассмотрим некоторые виды анализа режима подземных вод для решения перечисленных выше основных задач.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ОПЫТУ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Определение гидрогеологических параметров водоносных горизонтов, необходимых для оценки эксплуатационных запасов подземных вод и прогноза их режима, является одной из основных задач гидрогеологических исследований. И поэтому этим вопросам всегда уделялось большое внимание и посвящено значительное количество работ [1, 4, 9 и др.].

Перечислить достижения в данной области практически невозможно. Поэтому мы остановимся лишь на некоторых особенностях определения расчетных параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод в районах действующих водозаборов.

Одним из наиболее распространенных методов определения параметров по опыту эксплуатации является графоаналитический метод, предложенный Ц. Джейкоб и получивший широкое развитие в отечественных гидрогеологических исследованиях.

Метод основан на логарифмической аппроксимации формулы Тэйса путем представления ее в виде уравнений прямой линии по следующим схемам:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r^2} = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2} = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25a}{r^2} +$$

$$+ \frac{0,183Q}{km} \lg t = A_t + C_t \lg t, \text{ где } C_t = \frac{0,183Q}{km} \text{ и } A_t = C_t \lg \frac{2,25a}{r^2}; \quad (5.1)$$

$$S = \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{2,25at}{r^2} = \frac{0,183Q}{km} \lg 2,25at + \frac{0,183Q}{km} \lg \frac{1}{r^2} =$$

$$= A_r - C_r \lg r, \text{ где } C_r = \frac{0,366Q}{km} \text{ и } A_r = 2C_r \lg 2,25at; \quad (5.2)$$

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

$$= A_k + C_k \cdot \lg \frac{t}{r^2}, \text{ где } C_k = \frac{0{,}183Q}{km} \text{ и } A_k = C_k \lg 2{,}25a. \qquad (5.3)$$

В этих схемах приняты следующие обозначения [4] : S — понижение, м; Q — дебит водоотбора, м^3/сут; a — коэффициент пьезопроводности, м^2/сут; km — коэффициент водопроводимости пласта, м^2/сут; t — время, сут; r — радиус выработки или расстояние от центра возмущения до наблюдательной скважины, м.

Обработка данных по первой схеме осуществляется в виде построения графика $S - \lg t$, получившего название графика временного прослеживания, по второй — в виде графика $S - \lg r$ (площадного прослеживания) и по третьей — в виде графика $S - \lg \frac{t}{r^2}$ (комбинированного прослеживания). В первом случае используются данные по понижениям в каждой скважине в отдельности, а во втором и в третьем случаях — по всем имеющимся наблюдательным скважинам сразу. Для безнапорных условий по ординате вместо S откладывается $S(2H - S)$. Во всех случаях параметры определяются при достижении квазистационарного режима, при котором имеет место логарифмическая зависимость в уравнении Тэйса. Можно принять, что такой режим наступает при условии $\frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ или через время $t > \frac{r^2}{0{,}4a}$, а радиус его зоны $r = 0{,}63\sqrt{at}$. В этой зоне темп снижения уровней одинаков, т. е. они перемещаются параллельно самим себе. Критерием квазистационарного режима может служить прямолинейность расположения точек на графике $S - \lg t$, параллельность прямых на графике $S - \lg t$, построенных по серии скважин для различных интервалов времени t, а также выход на прямую, касательную к кривым графиков комбинированного прослеживания.

Водопроводимость и пьезопроводность пластов определяется из полученных графически коэффициентов уравнений прямой линии — угловому коэффициенту C и отрезку A, отсекаемому прямой на нулевой ординате, в каждой из трех указанных схем, следующим образом:

$$km = \frac{0{,}183Q}{C_t}; \quad \lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A_t}{C_t} \text{ или } a = 0{,}445r^2 \, e^{A/C}; \qquad (5.4)$$

$$km = \frac{0{,}366Q}{C_r}; \quad \lg a = \frac{2A_r}{C_r} - 0{,}35 - \lg t; \qquad (5.5)$$

$$km = \frac{0{,}183Q}{C_k}; \quad \lg a = \frac{A_k}{C_k} - 0{,}35. \qquad (5.6)$$

В безнапорных условиях уровнепроводность a_y определяется по аналогичным зависимостям как и пьезопроводность, а коэффициенты фильтрации рассчитываются по формулам: $k = \frac{0{,}36Q}{C_t}$; $k = \frac{0{,}73Q}{C_r}$ и $k = \frac{0{,}366Q}{C_k}$. При необходимости упругая или гравитационная водоотдача определяется по формулам: $\mu^* = \frac{km}{a}$ и $\mu = \frac{kh_{ср}}{a_y}$, где μ^* – упругая водоотдача; μ – гравитационная водоотдача.

Многочисленные особенности применения этого метода в различных гидрогеологических условиях и условиях возмущенного пласта при опытных работах подробно рассмотрены в работах [1, 4, 30 и др.].

Из них применительно к особенностям анализа данных режима подземных вод в районах водозаборов следует подчеркнуть следующее.

1. Водоотбор ведется, как правило, из нескольких эксплуатационных скважин или сосредоточенных групп скважин, вокруг которых образовались свои взаимодействующие между собой воронки депрессии, или из одной комплексной группы скважин, вокруг которой сформировалась единая воронка депрессии. Такое подразделение схем эксплуатации условно, так как во втором случае в районе каждой скважины также имеется своя мини-воронка. Однако при большом числе скважин и компактном их размещении изучить каждую из таких воронок невозможно. Такой водозабор обычно рассматривается как один большой колодец с приведенным радиусом $R_0 = \frac{\sqrt{F}}{\pi}$ для площадной системы или $R_0 = 0{,}2l$ – для линейной схемы водозаборных скважин, где F – площадь расположения скважин и l – длина ряда скважин. Поэтому в тех случаях, когда расчет прогнозного понижения $S_{вн}$ или оценка параметров ведется для всего водозабора в целом, в уравнениях (5.1) – (5.3) вместо r используется радиус большого колодца, а в качестве Q – суммарный водоотбор. Понижение же в каждой скважине, по Ф.М. Бочеверу, может быть дополнительно определено по зависимости: $S_c = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{r_{пр}}{r_c} + 0{,}5\xi_0\right]$, (5.7) где Q – дебит каждой скважины; $r_{пр}$ – приведенный радиус условной области каждой скважины; r_c – радиус скважины; ξ_0 – фильтрационное сопротивление, учитывающее несовершенство скважины (оценивается по методике Н.Н. Веригина); $r_{пр} = \frac{\sigma}{2\pi}$ – для линейной и кольцевой схем, где σ – расстояние между скважинами, и $r_{пр} = 0{,}47\sqrt{\frac{F}{\pi}}$ – для площадной схемы.

Суммарное понижение S в каждой скважине определяется как сумма понижений: $S = S_{вн} + S_c$. Это необходимо оценивать и учитывать при выборе данных об уровнях, используемых для определения параметров, например используя графики восстановления уровней подземных вод при остановках или сокращении водоотбора, как это было показано на рис. 5.

2. Практически все водозаборы работают с переменными во времени дебитами. Это обусловлено и постепенностью ввода водозабора в строй, и ростом водопотребления во времени и многими другими факторами. Отмечается и нерегулярность водоотбора, связанная с отключениями отдельных скважин для их ремонта (чистки, углубления, замены насосов). Поэтому практически всегда требуется схематизация условий водоотбора во времени, его усреднение плавными кривыми или ступеньками.

При возможности линейной аппроксимации водоотбора во времени для определения расчетных параметров можно использовать те же приемы графоаналитической обработки данных, но построив графики в координатах $\frac{S}{Q} - \lg t$, $\frac{S}{Q} - \lg r$ и $\frac{S}{Q} - \lg\frac{t}{r^2}$. Расчеты водопроводимости при этом проводятся согласно формулам: $km = \frac{0{,}183}{c_t}$; $km = \frac{0{,}366}{c_r}$ и $km = \frac{0{,}183}{c_k}$.

При ступенчатом изменении дебита в водозаборе, состоящем из отдельных эксплуатационных скважин или сосредоточенных групп взаимодействующих скважин, гидрогеологические параметры определяются с учетом приведенного времени и приведенного расстояния [38]

$$S = \frac{0{,}183Q_n}{km} \lg \frac{2{,}25at_{пр}}{r^2_{пр}}, \qquad (5.8)$$

где Q_n — суммарный дебит системы скважин на данной ступени возмущения; $t_{пр}$ — приведенное время опыта.

$$\lg t_{пр} = Q \lg t \pm \Delta Q_1 \lg(t - t_2) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1}(t - t_n), \qquad (5.9)$$

где Q_1 — начальный суммарный дебит; ΔQ_i — изменение суммарного дебита по ступеням (1, 2....); $\Delta Q_1 = Q_2 - Q_1$; $\Delta Q_2 = Q_3 - Q_2$; $\Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1}$, t — текущее время от начала работы всей системы; t_1 — время начала соответствующих ступеней суммарного водоотбора (знак плюс — возрастание, знак минус — уменьшение водоотбора); $r_{пр}$ — приведенное расстояние до интересующей наблюдательной скважины.

$$\lg r_{пр} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n}, \qquad (5.10)$$

где Q_i — дебиты отдельных скважин на ступенях возмущения $i = 1, 2, \ldots$; r_i — расстояние от интересующей наблюдательной скважины до каждой из взаимодействующих с ней.

Графики прослеживания в этом случае строятся в координатах: $S - \lg t_{пр}$; $S - \lg r_{пр}$; $S - \lg\frac{t_{пр}}{r^2_{пр}}$, а расчетные параметры определяются по обычным формулам, но с использованием суммарного дебита Q_n и приве-

денных $r_{пр}$ и $t_{пр}$. Обработка многолетних рядов наблюдений производится обычно по среднегодовым значениям уровней и дебитов водозабора. Неизбежный разброс точек на графиках прослеживания, вызванный различными причинами, и прежде всего из-за неравномерности водоотбора по годам и внутри года, усредняется на графике. Возможная субъективность такого усреднения может повлиять на результаты расчетов. Поэтому последние целесообразно корректировать различными способами оценок параметров. Так, при достаточном количестве наблюдательных скважин за пределами большого колодца могут использоваться все три вида графиков прослеживания. Кроме того, в условиях квазистационарного режима фильтрации для определения водопроводимости пластов может быть использована формула Дюпюи для двух наблюдательных скважин: $km = \frac{0{,}366Q \lg \frac{r_2}{r_1}}{S_1 - S_2}$, где r_1 и r_2 — расстояния до первой и второй наблюдательных скважин; S_1 и S_2 — понижения в скважинах на какой-то период времени t.

Аналогичным образом с использованием различных аналитических расчетов могут быть определены расчетные параметры и в условиях стабилизации уровней. Способы таких расчетов приведены в многочисленных справочных руководствах гидрогеолога.

При ступенчатом изменении дебита водозабора, схематизируемого большим колодцем, расчетные параметры определяются для всего водозабора в целом по наблюдательным скважинам, отстоящим от водозабора на расстоянии свыше $1{,}5R_0$ для площадной схемы и свыше $0{,}75l$ для линейной системы с учетом приведенного времени $t_{пр}$:

$$t_{пр} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Q_i t_i}{Q_n}, \qquad (5.11)$$

где Q_i — дебит водозабора на отрезке времени t (ступени i); Q_n — дебит водозабора на последнем этапе эксплуатации.

По удаленным от центра водозабора на расстояние r скважинам проверяется время наступления квазистационарного режима $\left(t \geqslant \frac{2{,}5r^2}{a}\right)$. Расчет параметров производится по обычным зависимостям, как для одиночных скважин, но с использованием приведенного времени. Для этого графики строятся в координатах $S - \lg t_{пр}$; $S - \lg \frac{t_{пр}}{r^2}$, и в формуле для расчета пьезопроводности по графикам площадного прослеживания также используется $t_{пр}$.

При построении графиков прослеживания для периодов с $Q < Q_n$ (при постоянном увеличении водоотбора) или $Q_i < Q_{max}$ происходит как бы сжатие наблюдений пропорционально коэффициенту $a_i = Q_i/Q_{max}$. Поэтому шкала времени при нанесении на график значений понижений должна

быть или пропорционально сокращена, или при равномерной шкале $t_{пр}$ необходимо пропорционально увеличить интервал усреднения понижений.

Использование наблюдательных скважин внутри большого колодца для определения параметров не рекомендуется, так как на результаты расчетов может существенно сказаться влияние ближайшей эксплуатационной скважины, что сделает их непредставительными.

3. Отмеченная выше неравномерность водоотбора, и, в частности, резкое его сокращение в выходные и предпраздничные дни, а также при ремонтных работах на водозаборе вызывают часто резкое восстановление уровней, которое может быть использовано для определения расчетных параметров. В процессе работ по переоценке запасов подземных вод по водозабору подобные резкие сокращения водоотбора могут быть даже запланированы. Учитывая то, что в подавляющем большинстве случаев период наблюдаемого восстановления уровней t намного меньше периода эксплуатации T, т. е. всегда соблюдается условие $t \ll 0{,}1T$, обработка результатов наблюдений за восстановлением уровней осуществляется аналогично, как и для случаев снижения уровней при постоянном водоотборе. Поэтому графики прослеживания строятся здесь в координатах $S^* - \lg t$, $S^* - \lg r$ и $S^* - \lg \frac{t}{r^2}$. Однако при расчете водопроводимости вместо суммарного водоотбора используется та часть расхода, на которую изменился водоотбор, вызвавший восстановление уровней, т. е. $km = \frac{0{,}183\Delta Q}{C_t} = \frac{0{,}366\Delta Q}{C_r} = \frac{0{,}183\Delta Q}{C_k}$. Возможность использования данного способа оценки параметров ограничивается продолжительностью времени восстановления, влияние которого должно проявляться на расстоянии $R > 1{,}5R_0$ или $R > 0{,}75l$ и достичь расположенных на этом расстоянии и далее наблюдательных скважин. Радиус зоны, в пределах которой можно зафиксировать такие восстановления уровней, определяют по формуле : $R = 1{,}5\sqrt{at}$.

На наблюдениях за скоростью перераспределения давления в пласте в период таких остановок или сокращений водоотбора основан и другой способ определения коэффициента пьезопроводности пласта, получивший название метода "точки перегиба", предложенный И.А. Чарным и успешно проверенный на практике П.М. Гасс. Сущность метода состоит в следующем. Из основной формулы упругого режима следует, что понижение уровня увеличивается с увеличением времени и уменьшается с увеличением расстояния. При этом скорость изменения давления, определяемая как первая производная $\frac{\partial p}{\partial t}$ или $\frac{\partial S}{\partial t}$ в любой точке пласта, имеет наибольшее значение в определенный момент, который может быть определен по формуле

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{Q}{4\pi k m t^2} e^{-\frac{r^2}{4at}} \left(\frac{r^2}{4at} - 1\right) = 0, \qquad (5.12)$$

откуда

$$\frac{r^2}{4at} = 1. \qquad (5.13)$$

На кривой восстановления или снижения уровня в наблюдательной скважине при изменении водоотбора во времени влияние этого изменения должно быть зафиксировано в виде точки перегиба. Как видно из формулы (5.13), время запаздывания изменений в режиме уровня подземных вод в наблюдательных скважинах по отношению к соответствующим изменениям в центре водозабора (t_0) зависит только от коэффициента пьезопроводности и расстояния наблюдательной скважины от водозабора:

$$t = \frac{r^2}{4a}, \qquad (5.14)$$

следовательно

$$a = \frac{r^2}{4t_0}. \qquad (5.15)$$

Подставляя выражение (5.15) в уравнение Тэйса, получается зависимость

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[-\mathrm{E}_i\left(-\frac{t_0}{t}\right)\right], \qquad (5.16)$$

которая при построении ее в координатах $\Delta S - \mathrm{E}_i\left(-\frac{t_0}{t}\right)$ представляет собой уравнение прямой линии, проходящей через начало координат с угловым коэффициентом

$$B = \mathrm{tg}\alpha = 0{,}08\frac{Q}{km}, \qquad (5.17)$$

откуда $km = 0{,}08\frac{Q}{B}$. (5.18)

Время t_0, соответствующее максимальному изменению напоров в наблюдательной скважине, может быть снято с графика режима уровня подземных вод, построенного в координатах $\Delta S - t$ (рис. 27, *а*). После этого, зная расстояние наблюдательной точки от центра водозабора, можно определить коэффициент пьезопроводности по формуле (5.17). Для точного определения времени наступления точки перегиба, от которого в основном зависит и точность определения значения коэффициента пьезопроводности, целесообразно использовать данные по самописцам уровня или производить достаточно частые замеры уровня подземных вод в моменты резких изменений водоотбора. Время t_0 в зависимости от фильтрационных свойств водоносного горизонта и расстояний наблюдательных

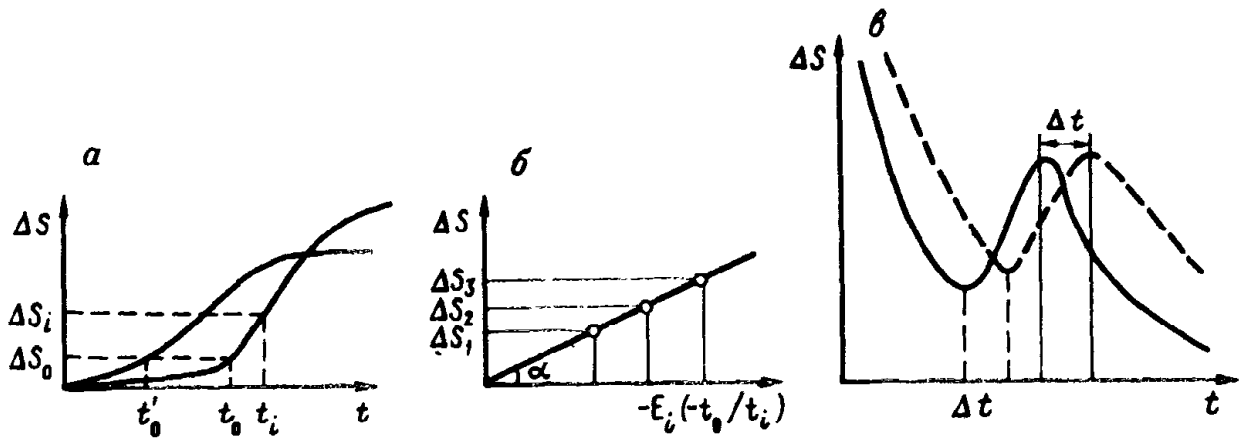


Рис. 27. Схемы определения коэффициента пьезопроводности по "времени добегания".

а — с выделением точек перегиба на кривых восстановления или снижения уровней; *б* — по графику зависимости $\Delta S = f[-E_i \cdot (-t_0/t)]$; *в* — по времени запаздывания передачи напора между наблюдательными скважинами

скважин от водозабора может изменяться от нескольких минут до нескольких суток.

В тех случаях, когда точку перегиба достаточно точно определить трудно (см. рис. 27, *а*), целесообразно определить значение t_0 методом подбора, построив графики зависимости

$$\Delta S = f\left[-E_i\left(-t_0/t\right)\right] \tag{5.19}$$

При правильном определении t_0 график указанной зависимости должен выражаться в виде прямой, проходящей через центр координат (рис. 27, *б*) с угловым коэффициентом B (5.17). Для этого необходимо иметь минимум три точки отсчета значений ΔS для различных отрезков времени t_i.

Определив тангенс угла α прямо с графика или по соотношению $B = \dfrac{\Delta S_i}{E\left(-t_0/t_i\right)}$ (лучше всего по крайним значениям), а также зная изменение дебита водозабора, можно определить водопроводимость пласта по формуле (5.18). Как видно из уравнений (5.15) и (5.16), коэффициент B зависит только от размера водоотбора и прямо пропорционален ему. Следовательно, построив график зависимости $B = f(Q)$, для любой наблюдательной скважины в районе водозабора, имеющей длительный ряд наблюдений за режимом уровня подземных вод, по нему можно восстанавливать за прошедшее время данные по изменениям водоотбора, если наблюдения за ними проводились регулярно.

Метод "точки перегиба", так же как и графоаналитический, является достаточно точным и характеризует параметры не только всего водоносного горизонта на отрезке от центра водозабора до наблюдательной скважины, но и для значительно большей области. Лишь при очень больших расстояниях от водозабора, когда естественные изменения в режиме под-

земных вод преобладают над искусственными, происходящими под влиянием эксплуатации, изменения в размерах водоотбора могут проявляться нечетко и установить t_0 будет трудно. Аналогичным образом коэффициент пьезопроводности может быть определен по "времени добегания" изменений в режиме уровня подземных вод, происходящих под влиянием любых изменений водоотбора, приводящих к перемене знака изменений понижений в наблюдательных скважинах. Время наступления точки перемены знака ΔS на графике снижения уровня в наблюдательных скважинах фиксируется с определенным запаздыванием Δt, которое зависит от расстояния наблюдательной скважины от центра водозабора и от коэффициента пьезопроводности (рис. 27, *в*). В соответствии с этим при $\frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ коэффициент пьезопроводности может быть определен по формуле

$$a = \frac{r^2}{2{,}25\Delta t}, \qquad (5.20)$$

а при $\frac{r^2}{4at} > 0{,}1$, т. е. пока квазистационарный режим не наступил, по формуле

$$a = \frac{r^2}{4at}. \qquad (5.21)$$

Следовательно, зная время Δt, через которое изменения в режиме водоотбора проявились в центре водозабора и в наблюдательной скважине, отстоящей от центра на расстояние r, или между двумя наблюдательными скважинами, расположенными по створу, проходящему через центр водозабора, и отстоящими друг от друга на расстояние r, по формулам (5.20) и (5.21) можно определить коэффициент пьезопроводности.

Данный способ определения коэффициента пьезопроводности удобен, так как при этом не требуется знать изменения дебита водозабора. Для этого достаточно лишь знать время изменения дебитов (как при уменьшении, так и при их увеличении) и иметь данные по режиму уровня для фиксирования времени максимального его подъема.

Для того чтобы точно зарегистрировать время изменения знака ΔS как в данном, так и в предыдущем методе, необходимо оборудовать наблюдательные скважины самописцами. При ограниченном количестве самописцев целесообразно для определения гидрогеологических параметров устанавливать их поочередно на каждой из наблюдательных скважин.

Одной из основных проблем при определении точности расчетов эксплуатационных запасов подземных вод является оценка неоднородности строения водоносного горизонта и выбор правильных расчетных параметров, отражающих существующую неоднородность строения пласта. При применении изложенных методов и при выборе для этого наблюдательной сети необходимо стремиться использовать для расчетов парамет-

ров наблюдательные скважины, расположенные как можно дальше от центра водозабора. При таком расположении сети изложенные методы (особенно по "точке перегиба" и "по времени добегания") будут характеризовать параметры слоя, усредненные для всей зоны, расположенной между наблюдательной скважиной и центром водозабора. Однако это не исключает необходимости наблюдений в центре водозабора, которые могут быть использованы не столько для определения параметров, сколько для определения текущих и прогнозных понижений уровней.

Расчеты, основанные на результатах наблюдений за развитием воронки депрессии, могут повторяться несколько раз для проверки и уточнения параметров, после чего должны быть выбраны средние значения расчетных параметров из нескольких определений.

4. Одной из важнейших особенностей анализа режима подземных вод в районе водозаборов является его использование для оценки условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод в процессе эксплуатации. Длительный водоотбор и связанное с ним значительное углубление и расширение воронки депрессии приводит к тому, что в зону ее влияния могут быть включены питающие и непроницаемые плановые границы, начнется осушение менее проницаемых слоев в нижних слоях горизонта, увеличится перетекание или произойдет осушение вышележащих горизонтов и т. д. Эти изменения могут найти отражение и в изменении расчетных параметров во времени и в изменении законов снижения уровней подземных вод во времени.

Одним из методов учета изменений неоднородности строения водоносного горизонта в плане и по вертикали является изучение в процессе эксплуатации изменений удельных дебитов водозабора с углублением воронки депресии и построение графиков изменения удельных дебитов или удельных понижений с глубиной (при условии установившегося режима фильтрации). Сложность взаимодействия между собой эксплуатационных скважин не позволяет устанавливать такие зависимости для каждой скважины в отдельности. Но определение их для всего водозабора в целом с учетом суммарного водоотбора и неизменной площади расположения эксплуатационных скважин представляет несоменнный интерес, так как позволяет определить изменения фильтрационных свойств с глубиной, оценить изменчивость восполнения и роль появляющихся со временем границ. Особенно важно это устанавливать для водозаборов, эксплуатирующих грунтовые воды в трещиноватых и закарстованных отложениях, в напорных горизонтах в случае, когда уровни этих вод снижаются ниже кровли водоносного пласта, а также в ограниченных в плане пластах.

Для построения графика $\Delta S = f(Q)$ значения понижений следует брать по наблюдательным скважинам в центре и за пределами большого колодца на расстоянии полутора-двух его радиусов. Определение указанных зависимостей по разным направлениям дает возможность уточнять запасы подземных вод при установившемся режиме фильтрации методом "удельных воронок депрессий", предложенным Н.А. Плотниковым. Под удельным понижением понимается отношение понижения уровня в центре воронки S_0 к суммарному водоотбору ΣQ. Построив график зависимости

удельного понижения от времени, можно установить обеспеченность водоотбора восполнением, $\frac{S_0}{\Sigma Q} = f(t) \approx \text{const}$ свидетельствует об обеспеченности водозабора восполнением, что определяет увеличение понижения лишь пропорциональным увеличению водоотбора. По увеличению удельного понижения во времени можно судить о необеспеченности водоотбора восполнением, что приводит к быстрому росту воронки депрессии и сработке естественных запасов подземных вод. В отдельных случаях за счет перераспределения водоотбора в пространстве может произойти временное уменьшение $\frac{S_0}{\Sigma Q}$ во времени, после чего это отношение должно либо стабилизироваться, либо начать вновь расти.

При неустановившемся режиме фильтрации важным является установление его закона, который в условиях неограниченного и полуограниченного пластов имеет логарифмический $S = f(\lg t)$ характер, в полосообразных пластах — параболический или степенной $S = f\sqrt{t}$, а в замкнутых структурах — линейный $S = f(t)$.

Установив закон изменений уровней во времени, можно не только определить наиболее приемлемые способы определения расчетных гидрогеологических параметров, но и оценить характер граничных условий, в которых работает анализируемый водозабор в тот или иной период его существования.

При логарифмическом законе снижения уровней параметры оцениваются вышеизложенными приемами и, как правило, отражают истинные значения параметров (без влияния на них граничных условий). Конечные же отрезки прямых на графиках прослеживания отражают нередко влияние границ на развитие понижений во времени. На анализе роли границ мы остановимся ниже.

Каких-либо особых проблем при уточнении расчетных параметров на водозаборах, работающих в установившемся режиме фильтрации, обычно не возникает. Такой режим, как правило, имеет место или на береговых водозаборах, работающих с границей H—const, или в условиях перетекания из смежных горизонтов.

На водозаборах инфильтрационного типа расчетные параметры достаточно хорошо могут быть определены уже на стадии детальной разведки, так как роль границы может быть изучена даже при сравнительно кратковременных опытно-фильтрационных работах и по наблюдениям за режимом подземных вод в паводок. В условиях эксплуатации стационарный режим устанавливается на самом начальном ее этапе, понижения в скважинах быстро достигают в периоды межени своих допустимых величин. Увеличение водоотбора может в таких случаях осуществляться за счет удлинения ряда водозаборных скважин, за счет искусственного подпитывания, или за счет изменения условий водоотбора (увеличение числа скважин внутри ряда, сооружение галлерей или лучевых водозахватных сооружений, проведение водоотбора синхронно с режимом поверхностных вод). Основным вопросом при этом становится изучение возможного измене-

ния граничных условий и обеспеченность прогнозного водоотбора восполнением, на чем мы остановимся ниже.

На водозаборах, работающих в условиях перетекания из смежных горизонтов, особенно в слоистых толщах, и расчетные параметры и само перетекание могут быть изучены лишь в процессе эксплуатации, так как в процессе разведки добиться стабилизации уровней бывает трудно. Оценка параметров в этом случае производится по первому этапу эксплуатации, в условиях неустановившегося режима — графоаналитическим методом или по эталонным кривым Хантуша, построенным по зависимостям:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W\left(u, \frac{r}{B}\right); \quad u = \frac{r^2}{4at}; \tag{5.22}$$

где W — функция Хантуша (представлена в виде графиков, табулирована и приведена в работах [4, 11 и др.].

В сложных гидрогеологических и хозяйственных условиях для определения расчетных параметров может использоваться моделирование на сплошных и дискретных моделях. Преимущество этого способа заключается в возможности определения расчетных параметров не в отдельных точках, а по всей площади воронки депрессии, а также в возможности определять не только фильтрационные свойства эксплуатируемого водоносного горизонта, но и разделяющих его глинистых слоев. По известному распределению напоров в исследуемой области фильтрации и граничным условиям уточняется пространственное распределение параметров (водопроводимость и упругоемкость), а по известным параметрам и распределению напоров — величина питания или перетекания. Прогнозная задача снижения уровней при заданном водоотборе решается после выполнения указанных инверсной и обратной задач. Решая обратные задачи, удается установить несоответствия гидрогеологических параметров и граничных условий наблюдаемому распределению поля напоров, детализировать и учесть в расчетах плановую фильтрационную неоднородность пласта и любой сложности геометрию границ. Однако следует иметь в виду, что выполняемый подбор значений параметров и границ пласта не может быть однозначным и полученная модель рассматривается как одна из возможных, что не исключает и условности и приближенности оценок, осуществляемых и этим методом. Кроме того, для осуществления моделирования необходимо иметь значительно более густую наблюдательную сеть, которая могла бы дать достаточно реальную пространственную картину.

УТОЧНЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ И ИСТОЧНИКОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Одной из основных задач изучения режима подземных вод в районах действующих водозаборов является своевременное уточнение изменений условий на границах пласта с тем, чтобы при расчетах запасов подземных вод и прогноза изменения режима уровня подземных вод своевременно учесть эти изменения или путем подбора другой расчетной формулы, бо-

лее полно отражающей изменившиеся условия, или путем внесения соответствующих корректив в величины параметров. Анализу влияния граничных условий на работу водозаборов также посвящено много работ [5, 11, 13, 32, 35 и др.].

В практике наблюдений за режимом подземных вод на действующих водозаборах может встретиться много различных случаев изменений граничных условий в процессе эксплуатации. Наиболее часто встречающиеся из них следующие: а) изменение степени гидравлической связи водоносного горизонта с рекой; б) изменение условий взаимодействия водоносных горизонтов; в) достижение воронкой депрессии границ пласта и изменение условий восполнения эксплуатационных запасов подземных вод.

Рассмотрим эти случаи и некоторые методы или приемы их учета.

Изменение степени гидравлической связи водоносного горизонта с рекой является одним из главных вопросов изучения режима подземных вод на инфильтрационных водозаборах. Усиление кольматации пор пород водоносного горизонта за счет фильтрации через них речных вод с высоким содержанием взвешенных частиц, а также заиление русла реки могут привести сначала к частному, а затем и к полному отрыву уровня подземных вод от реки.

Для определения изменения степени гидравлической связи с рекой и расчетного значения расстояния водозабора от реки необходимо установить наблюдения в эксплуатационной и наблюдательной скважинах, расположенных между водозабором и рекой. Значение a, по предложению Е.Л. Минкина, определяется подбором из формул:

для напорных вод
$$\frac{S_1}{S_2} = \lg\frac{2a}{r_0} / \lg\frac{2a-b}{b} = \alpha; \qquad (5.23)$$

для грунтовых вод
$$\frac{S_1(2H_0 - S_1)}{S_2(2H_0 - S_2)} = \lg\frac{2a}{r_0} / \lg\frac{2a-b}{b}, \qquad (5.24)$$

где S_1 и S_2 — понижения в эксплуатационной и наблюдательной скважинах; a — расчетное расстояние водозабора от реки; b — расстояние наблюдательной скважины от водозабора; r_0 — радиус эксплуатационной скважины; H_0 — мощность водоносного горизонта до откачки.

Подставляя в правые части указанных формул различные значения a, строится график зависимости α от a. После чего, зная фактически полученное при откачке значение $\alpha = S_1/S_2$ или $\alpha = \frac{S_1(2H_0 - S_1)}{S_2(2H_0 - S_2)}$, с графика снимается расчетное значение величины a_p с учетом ΔL, откуда $\Delta L = a_p - a$.

Более точные результаты могут быть получены по двум наблюдательным скважинам по соотношению

$$\alpha = \lg\frac{(2a - b_1)}{b_1} / \lg\frac{(2a - b_2)}{b_2}, \qquad (5.25)$$

где b_1 и b_2 — расстояние соответственно первой и второй наблюдательных скважин от центральной.

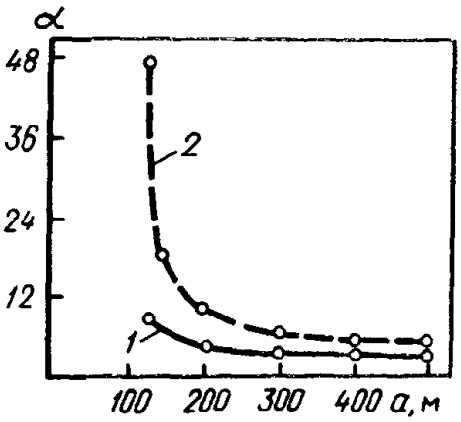


Рис. 28. График зависимости $\alpha = \frac{2a}{r_0} / \frac{2ab}{b}$ **от расстояния (*a*) до реки.**

1–2 — расположение наблюдательной скважины: *1* — между водозабором и рекой (a_1 = = 150 м; *B* : 120); *2* — за рекой (a_2 = 165 м; *B* : 60)

Данный способ оценки ΔL, строго говоря, применим лишь при симметричной схеме потока у реки. Однако для приближенных оценок он может быть использован и в случае, когда снижение уровня наблюдается за рекой. Но здесь в расчет следует брать данные по расположенной за рекой скважине, так как при этом более полно учитывается степень связи водоносного горизонта с рекой. На рис. 28 приведен пример расчета расстояния до реки по Курскому водозабору, произведенный для двух случаев: 1) для водозабора и наблюдательной скважины, расположенной между водозабором и рекой; 2) для водозабора и наблюдательной скважины, расположенной за рекой.

Как видно из рис. 28, во втором случае $a_2 > a_1$. В расчетах запасов подземных вод величина ΔL учитывается лишь при условии подпертого режима, т. е. когда отрыва уровней нет.

Проводя периодически аналогичные расчеты, можно установить зависимости изменения ΔL и затем A_0 от времени и от расхода водозабора, по которым можно уточнять возможное время полного отрыва уровня от реки. Условием отрыва, по Е.Л. Минкину, для линейного ряда $d < 0{,}3l$ при сохранении речного стока круглый год может служить соотношение

$$A_0 \geqslant \frac{(H_0 - m)\ 4b\left(d + \frac{\sigma}{\pi} \ln \frac{\sigma}{\pi r_0}\right)}{kS\ (2H - S)}, \qquad (5.26)$$

где H_0 — превышение уровня воды в реке над подошвой водоносного горизонта; m — мощность водоносного горизонта под руслом реки; b — половина ширины русла; d — расстояние от водозабора до реки; σ — расстояние между эксплуатационными скважинами в ряду; r_0 — радиус скважины; H — мощность горизонта в центре водозабора; S — понижение в центре водозабора; l — длина ряда.

Единичный линейный расход водозабора q, при котором произойдет отрыв уровней подземных вод от реки, в этом случае определяется соотношением

$$g = \frac{kS(2H - S)}{2d + \frac{2\delta}{\pi} \ln \frac{\delta}{\pi r_a}} > \frac{H_0 - m}{A_0} 2b. \qquad (5.27)$$

При наличии отрыва уровня подземных вод от реки развитие воронки депрессии осуществляется не в условиях полуограниченного пласта с постоянным напором на границе, а в условиях неограниченного пласта или пласта-полосы с дождеванием. Эту задачу следует решать методом моделирования.

Изменение условий взаимодействия водоносных горизонтов можно наблюдать чаще всего при эксплуатации напорных вод. На первых этапах эксплуатации при небольших градиентах, не превышающих начальных, перетекание отсутствует и зависимость снижения уровня при постоянном водоотборе подчиняетсся логарифмическому закону. Перетекание начинается лишь через некоторое время. Время его "включения" может быть установлено по графикам временного прослеживания по периодам, когда прямолинейный участок зависимости $S = f(\lg t)$ покажет на четкую тенденцию к стабилизации снижения уровней и начнет приближаться к линии, параллельной оси абсцисс. При возрастающем водоотборе подобную тенденцию дают графики $S/Q - \lg t$ или $S - \lg t_{пр}$. Отмечается тенденция к стабилизации и в удельных понижениях во времени $S/Q = f(t)$. С этого момента расчеты водозаборов проводятся по формулам, учитывающим перетекание:

$$S = \frac{Q}{4\pi km}\left[2\ln\frac{1{,}12B}{r_0} + E_i\left(-\frac{at}{B^2}\right)\right], \qquad (5{,}28)$$

где B — коэффициент перетекания.

$$B = \sqrt{\frac{km}{k_1/m_1 + k_2/m_2}}. \qquad (5.29)$$

При наличии перетекания и сверху и снизу

При наличии перетекания или снизу, или сверху

$$B = \sqrt{\frac{km\ m_i}{k_i}}, \qquad (5.30)$$

где k_1, m_1 и k_2, m_2 — водопроводимости слабопроницаемых слоев, соответственно перекрывающих и подстилающих водоносный горизонт.

С увеличением времени водоотбора второй член уравнения становится малым, независимым от времени, что и отражает стремление уровней к стабилизации, а уравнение в этом случае имеет вид

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \ln\frac{1{,}12B}{r_0},$$

а при условии $r_0/B < 0{,}1 - 0{,}2$

$$S = \frac{Q}{2\pi km} K_0\left(\frac{r_0}{B}\right), \qquad (5.31)$$

где K_0 — символ преобразованной функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента (значения $K_0 x$) табулированы [11]); r_0 — расстояние до наблюдательной скважины или радиус большого колодца.

Коэффициент перетекания обычно определяется по данным наблюдений за режимом подземных вод по двум наблюдательным скважинам, расположенным за пределами большого колодца водозабора ($l > 1{,}5R_0$). Для этого на период отмеченной стабилизации уровней по понижениям S_1 и S_2 в наблюдательных скважинах на расстояниях r_1 и r_2 записывается соотношение

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{K_0 (r_1/B)}{K_0 (r_2/B)} = \alpha. \qquad (5.32)$$

Затем, задаваясь различными значениями B, определяют соотношение $\frac{K_0 (r_1/B)}{K_0 (r_2/B)} = \alpha$ и строят графики зависимости $\alpha = f(B)$. Зная значение $S_1/S_2 = \alpha$, с графиков снимают истинное значение B. Коэффициент перетекания также легко определить по графикам площадного прослеживания с использованием всех скважин за пределами большого колодца. Отложив на графике $S - \lg r$ значения понижений на время стабилизации уровней во всех скважинах, осреднив точки прямой и продлив ее до пересечения с осью абсцисс, т. е. до $S = 0$, можно определить радиус влияния водозабора $R = 1{,}12\,B$, откуда $B = 0{,}89\,R$.

При известных значениях B, km и m_0 можно определить и коэффициенты фильтрации разделяющего слоя при наличии перетекания только сверху (что чаще всего встречается в природе) или только снизу по формуле

$$k_0 = \frac{km\ m_0}{B^2}. \qquad (5.33)$$

Водопроводимость пласта km в таких случаях определяется графоаналитическими методами в период до наступления стабилизации. Уравнения (5.31) и (5.32) справедливы при условии, что водоотбор полностью определяется перетеканием через разделяющие слои, уровни в которых при этом не изменяются. В этом случае параметр B постоянен во времени. Однако последнее условие соблюдается далеко не всегда. Обычно водоотбор из нижележащих горизонтов нарушает баланс вышерасположенных горизонтов. Это приводит через какое-то время к снижению в них уровней и соответственно к росту величины B во времени. Это особенно вероятно в слоистых толщах. Кроме того, по мере снятия давления, особенно на первых этапах эксплуатации, происходит увеличение пористости и коэффициента фильтрации разделяющих слоев за счет упругого их расширения. Это приводит к некоторому изменению величины коэффициента перетекания. Этот процесс продолжается и на последующих этапах, когда начинается переуплотнение пластов. Поэтому параметр перетекания необходимо систематически проверять и устанавливать закономерности его

изменчивости во времени, используемую затем в прогнозах режима. В этом случае стабилизация уровней может смениться увеличением понижения со временем (как в неограниченном пласте), но уже с обобщенными параметрами как эксплуатируемого, так и смежного с ним горизонта, из которого осуществляется перетекание. Определив обычным графоаналитическим способом такие обобщенные параметры и зная параметры основного горизонта, можно получить параметры смежного горизонта. При равномерном снижении уровней в эксплуатируемом и питаемом горизонтах расчетные параметры определяются по графику площадного прослеживания в соответствии с формулой

$$\Delta S = \frac{Q}{4\pi km} \cdot \ln \frac{1{,}12B}{r}, \qquad (5.34)$$

где ΔS — разность напоров в верхнем и нижнем горизонтах во время t.

Водопроводимость опробуемого пласта определяется по угловому коэффициенту графика $\Delta S - \lg r$, а B — через радиус влияния ($B = 0{,}89R$).

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛАНОВЫХ ГРАНИЦ ПЛАСТА

В процессе длительной эксплуатации подземных вод воронка депрессии нередко достигает и плановых границ пласта, что в зависимости от характера границы (проницаемая или непроницаемая) отражается на графиках временного прослеживания в виде резкого уменьшения или, наоборот, увеличения уклона кривых $S = f(\lg t)$. В зависимости от расстояния границ от водозабора и расчетных параметров влияние на характер зависимости $S = f(t)$ может проявиться в различное время. Например, водозаборы, эксплуатирующие напорные воды в районах морских побережий, начинают ощущать влияние моря как границы с постоянным напором нередко лишь через много лет в зависимости от расстояния выхода пласта в море. До этого же момента эти водозаборы работают в условиях неограниченного пласта. Кроме того, если в одних случаях можно определить время $t = \frac{2{,}25R^2}{a}$, когда проявится влияние границы (если известно расстояние до нее) и определить ее влияние (если известен характер границы — река, непроницаемые отложения и т. д.) и форму, то в ряде случаев определить все это трудно. Особенно сложно установить границы, определяемые фильтрационной неоднородностью, которые могут иметь различные формы. Детально изучить такие границы практически можно лишь по эмпирическим данным наблюдений за режимом подземных вод в процессе их эксплуатации. В частности, о достижении воронкой депрессии каких-то новых границ пласта, ранее не учитываемых при схематизации гидрогеологических условий, можно судить по изменениям характера зависимости снижения уровня подземных вод от времени (например, с логарифмической на параболическую или линейную).

Для определения вида зависимости по данным наблюдений строится серия графиков типа $S = f(\ln t)$, $S = f\sqrt{t}$, $S = f(t)$. В качестве расчетной выби-

рается та зависимость, которая больше всего соответствует прямолинейной.

Подобрав наиболее подходящую по виду зависимость, определяют параметры этой кривой по спрямленному тем или иным способом графику зависимости $S - t$. В зависимости от граничных условий можно получить, например, следующие виды зависимостей $S = f(t)$: 1) для неограниченного, полуограниченного пласта и пласта-квадранта зависимость логарифмическая, типа $S = A + B\lg t$; 2) для пласта-полосы с контурами питания в виде источников на границе — параболическая, типа $S = A + B\sqrt{t}$; 3) для пласта-полосы с непроницаемыми границами — также параболическая, но вида $S = B\sqrt{t}$; 4) для пласта-круга ("бочка") с контуром питания в виде источников на границе пласта — зависимость прямолинейная, типа $S = A + Bt$; 5) для пласта-круга с непроницаемыми границами и отсутствием питания — также прямолинейная, но вида $S = Bt$. Определив параметры A и B, необходимо в дальнейшем их уточнить. Для этого проводится контрольный прогноз снижения уровня, который сопоставляется с данными реальных наблюдений.

Таким образом, установление типа зависимости $S = f(t)$ необходимо не только для установления и уточнения граничных условий, в которых работает водозабор, а также для прогнозов режима уровня во времени и уточнения гидрогеологических параметров. В частности, приемы спрямления криволинейных зависимостей дают возможность по ним быстро и достаточно точно давать прогноз снижения уровня на будущее, конечно до тех пор, пока воронка депрессии не достигнет каких-то новых границ и тип зависимости не изменится. В соответствии с этим определения типа зависимости необходимо производить периодически.

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВОСПОЛНЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Помимо рассмотренного выше способа прогнозной оценки изменения естественного питания подземных вод (см. гл. 4.) и способа оценки питания по карте гидроизогипс в районе воронки депрессии, изменения естественного восполнения запасов подземных вод можно определять и по данным наблюдений за режимом уровней подземных вод в процессе эксплуатации. Наиболее существенные изменения в питании подземных вод, которые трудно оценить точно на стадиях поисков и разведки подземных вод, могут произойти в районах, где возможен перехват скрытой разгрузки подземных вод на испарение. Это дополнительное питание легко определить по графикам временного прослеживания, определив водопроводимость пласта на первом этапе наблюдений без дополнительного питания. Определив уклон прямой графика $S - \lg t$ в периоде, когда испарение перехватывается, т. е. когда $C_t = \dfrac{0{,}183\,(Q_{экс} - Q_{доп})}{km}$, можно определить $Q_{доп} = Q_{экс} - 5{,}45C_t km$, где $Q_{экс}$ — реальный водоотбор; $Q_{доп}$ — дополнительное питание за счет снятия испарения.

Аналогичным образом можно определить роль любой дополнительной подпитывающей границы, например, когда в зону воронки депрессии

попадают болотные массивы, старицы, мелкие озера, участки рассредоточенного орошения, перетекание по гидрогеологическим окнам. Питанием со стороны таких границ обычно пренебрегают. Однако это дополнительное питание может оказаться существенным и дальнейшие прогнозные расчеты запасов считать не на величину $Q_{экс}$, а на $Q_{экс} - Q_{доп}$, что позволит более точно оценить запасы подземных вод при тех же допустимых понижениях. При сравнительно постоянном во времени питании, уменьшающем темп снижения уровней подземных вод по сравнению с тем, каким он мог бы быть в неограниченном пласте при отсутствии восполнения, размер этого питания ΔQ в реальных условиях эксплуатации можно найти из соотношения

$$\frac{C_{экс}}{C_{оп}} = \frac{Q + \Delta Q}{Q}, \text{ откуда}$$

$$\Delta Q = \frac{Q(C_{оп} - C_{экс})}{C_{оп}}, \tag{5.35}$$

где $C_{экс}$ и $C_{оп}$ — угловые коэффициенты графика $S - \lg t$ в условиях длительной эксплуатации и на период опытных работ или на начало эксплуатации; Q — производительность водозабора ($Q \approx \text{const}$).

При возможном возрастании питания за счет перехвата водоразделов подземных вод, вовлечения новых ручьев, снятия испарения с новых участков по мере развития воронки депрессии график $S - \lg t$ будет иметь серию прямолинейных отрезков при общей тенденции к стабилизации. Определив по каждому из прямолинейных отрезков ΔQ по формуле (5.35), можно построить график связи $\Delta Q = f(t)$ и, установив закон изменчивости питания во времени, спрямив этот график тем или иным способом ($\Delta Q - \lg t$, $\Delta Q - \lg\sqrt{t}$, $\Delta Q - \lg t^a$), учитывать его в прогнозных расчетах водозабора. Экстраполяция графика по уравнениям прямолинейной или криволинейной регрессии возможна при условии, если закон связи не изменится в будущем. При совершенной связи водоносного горизонта с рекой или с другим поверхностным водоемом, определяя периодически изменения сопротивления ложа водоема ΔL, можно определить изменчивость питания водозабора за счет подсоса поверхностных вод ΔQ по формуле

$$\Delta Q = Q \operatorname{erfc}\left(\frac{l + \Delta L}{2\sqrt{at}}\right), \tag{5.36}$$

где t — время с начала откачки; Q — производительность водозабора; l — расстояние водозабора от реки; erfc — функция, приведенная в [11].

В условиях планируемой сработки запасов подземных вод на расчетное время эксплуатации учет питания и его изменений особенно важен. В процессе эксплуатации по данным режимных наблюдений можно установить изменчивость сезонных амплитуд колебаний уровней во времени, построив и спрямив тем или иным способом графики связи $\Delta h = f(t)$.

В этом случае расчет снижения уровней во времени проводится из условия $S = S_0 - \Delta h$, где S — понижение при эксплуатации на прогнозное время t; S_0 — понижение, рассчитываемое гидродинамическим методом по исходным параметрам на время t без учета питания; $\Delta h = \sum_{i=1}^{n} \Delta h_i$ — сумма ежегодных подъемов уровней в период питания за n лет. При сравнительно равномерном питании $\Delta h = \Delta h_i t$, а при неравномерном $\Delta h = \alpha \Delta h_i t$, где α — угловой коэффициент спрямленного графика $\Delta h = f(t)$. В случае увеличения питания во времени $\alpha > 1$, а при уменьшении питания $\alpha < 1$.

ПРОГНОЗ РЕЖИМА УРОВНЯ И УТОЧНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Прогноз режима уровня подземных вод и на его основе уточнение эксплуатационных запасов подземных вод является одним из основных результатов исследований режима подземных вод в районах водозаборов.

Прогноз режима подземных вод в зависимости от условий их эксплуатации и перспектив развития водозабора должен производиться для следующих вариантов: 1) дебит водозабора сохраняется прежним; 2) дебит водозабора увеличивается и на протяжении всего расчетного времени будет изменяться по какому-то закону; 3) дебит водозабора будет сокращаться.

Прогноз режима при этом может производиться разными методами или приемами: аналитическими, графоаналитическими и методом математического моделирования. Анализ режима подземных вод выполняется в следующей последовательности.

1. По уточненным расчетным параметрам и граничным условиям определяется возможность реботы водозабора при существующем дебите в течение всего амортизационного его срока. Понижение при этом не должно превышать предельно допустимого. В качестве допустимых пределов обычно для напорных вод применяется величина напора плюс половина мощности водоносного горизонта, а для грунтовых вод — половина их мощности. В ряде случаев допустимость снижения уровня определяется техническими характеристиками установленного насосного оборудования, глубиной существующих эксплуатационных скважин, пропускной способностью фильтров скважин и другими причинами, а также экономическими соображениями о целесообразности и возможности переоборудования водозахватных устройств (скважин, насосов, сифона и т. д.).

2. В случае, если расчеты при существующем дебите водозабора показывают, что на конец расчетного срока сохранится какой-то остаточный столб воды свыше допустимого понижения, можно рекомендовать увеличение водоотбора. Для определения возможного увеличения водоотбора производится несколько расчетов с целью подбора такого оптимального дебита, при котором величина понижения к концу расчетного срока не будет превышать допустимого значения. Аналогичные расчеты нужно произвести и при случае, когда в процессе эксплуатации ожидается истощение запасов или снижение уровней подземных вод ниже допустимой нормы.

При этом необходимо подобрать такой оптимальный дебит (т. е. установить, насколько надо уменьшить водоотбор), при котором истощение наблюдаться не будет.

Выбор расчетных формул производится в зависимости от гидрогеологических условий района водозабора, режима его работы и условий взаимодействия с другими водозаборами.

Дебит водозабора, принимаемый при расчете прогнозного понижения уровней, должен быть выбран с учетом всей его предыдущей работы. В случае, если водозабор работал с переменным дебитом вокруг некоторого среднего, то уменьшаясь, то возрастая, расчетный дебит может быть определен по формуле: $Q_{ср} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \ldots + Q_n t_n}{t}$, где t — полное время работы водозабора.

При расширении водозабора, когда известны определенные этапы ввода в строй новых его очередей и соответственно этапы увеличения водоотбора, неравномерность эксплуатации учитывается введением "приведенного времени". В этом случае приведенное время работы водозабора определяется по формуле: $t_{пр} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i t_1}{Q_n}$, где Q_n — дебит водозабора на прогнозном этапе его работы.

Расчеты прогнозного уровня подземных вод необходимы не только на конечный этап расчетного периода. В отдельных случаях важными являются их расчеты и на промежуточные этапы — на год, два, три года вперед и более, а иногда даже и по месяцам, в пределах этих лет. Такие прогнозы необходимы для различных целей:

— уточнения расчетных параметров во времени. Для этой цели, сопоставляя прогнозные данные с фактически наблюдаемыми, можно вносить соответствующие поправки в параметры и тем самым уточнять сделанные расчеты на конечный период;

— установления времени выхода из строя отдельных менее глубоких эксплуатационных скважин, что возможно на водозаборах, эксплуатирующих грунтовые или межпластовые безнапорные воды, а также при одновременной эксплуатации нескольких прослоев напорных вод;

— уточнения размеров ежегодного восполнения запасов подземных вод и возможного изменения закона $S = f(t)$.

Для таких сравнительно кратковременных прогнозов лучше всего пользоваться графоаналитическими методами, охарактеризованными выше. Установив характер зависимости понижения от времени и представив эту зависимость в виде прямой линии при использовании охарактеризованных выше приемов построения графиков $S = f(\ln t)$, $Q/S = f(\ln t)$ и т. д., можно прогнозировать размеры понижений для любого этапа путем экстраполяции этих прямых во времени.

Для прогнозов из наиболее часто встречающихся и наиболее трудных случаев являются те, когда происходит постоянное увеличение водоот-

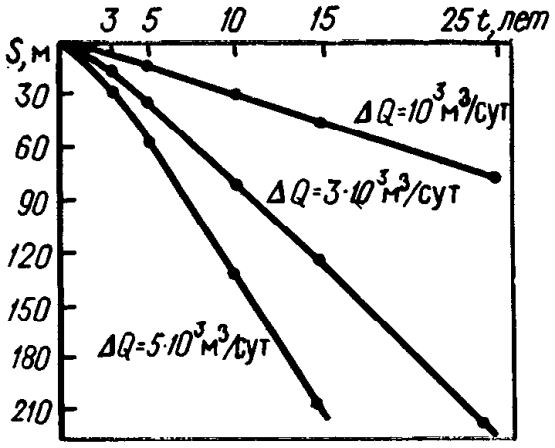


Рис. 29. Графики прогноза снижения уровней подземных вод при постоянном темпе ежегодного увеличения водоотбора (ΔQ)

бора во времени. Предвидеть, с каким темпом будет возрастать водоотбор, довольно трудно, но по опыту предыдущих лет можно установить, что в среднем водоотбор будет увеличиваться ежегодно на какую-то величину ΔQ, м^3/сут. Для упрощения расчетов можно принять, что эта величина в течение нескольких лет t будет постоянной. В общем виде понижение уровня при постоянном ступенчатом увеличении водоотбора может быть для напорных вод в неограниченном пласте определено уравнением:

$$S = \frac{Q}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25at}{r^2} + \frac{\Delta Q_1}{4\pi km} \cdot \ln \frac{2{,}25 \cdot a(t - t_1)}{r^2} + \frac{\Delta Q_2}{4\pi km} \times$$

$$\times \ln \frac{2{,}25 \cdot a(t - t_2)}{r^2} + \frac{\Delta Q_{n-1}}{4\pi km} \ln \frac{2{,}25 \cdot a(t - t_{n-1})}{r^2}. \qquad (5.37)$$

Учитывая то, что приращение дебита $\Delta Q_{\substack{i=n \\ i=1}}$ и врамя его изменения $t_{\substack{i=n-1 \\ i=n}}$ — величины постоянные, уравнение (5.35) после преобразований может быть представлено в следующем виде:

$$S = \frac{Q_0 \ln \frac{2{,}25at}{r^2} + \Delta Q\left[n \ln \frac{2{,}25a}{r^2} + \ln (t - n\Delta t)\right]}{4\pi km} \qquad (5.38)$$

где n — число изменений дебита в пределах расчетного времени t.

Построение кривых изменения понижений уровня подземных вод во времени по формуле (5.38) показывает, что при постоянном и равномерном увеличении дебита водозабора снижение уровня происходит практически по прямой (рис. 29). Этот вывод позволяет, проведя расчеты для нескольких лет, давать прогноз изменения уровня непосредственно по графику. Аналогичным образом могут быть выведены уравнения для определения снижений уровня и для других условий. Например, для пласта-полосы:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{B}{2\pi r_0} + \frac{3{,}55\sqrt{at}}{B}\right] + \frac{\Delta Q\,(n-1)}{2\pi km}\left[\frac{B}{\ln 2\pi r_0} + \right.$$

$$\left. + \frac{3{,}55\sqrt{a}}{B}\left(\sqrt{t_{n-1}} + \sqrt{t_{n-2}} + \ldots + \sqrt{t_2} + \sqrt{t_1}\right)\right], \qquad (5.39)$$

где n — число расчетных лет.

Прогноз режима подземных вод в районах водозаборов со сложными гидрогеологическими условиями наиболее точно можно дать, используя лишь методы математического моделирования. При помощи моделирования путем решения обратных задач могут быть также уточнены и расчетные гидрогеологические параметры. Техника и приемы моделирования достаточно полно изложены в соответствующей литературе. Оценка эксплуатационных запасов может быть произведена и без учета влияния границ, а для схемы условного неограниченного пласта с обобщенными параметрами, рассчитанными по последним наблюдаемым при эксплуатации отразкам прямых линий на графиках $S - \lg t$, формирующихся под влиянием всех границ пласта. При наличии питающих границ величины водопроводимости возрастают в 1,5—5 раз, а пьезопроводности — иногда на два порядка становятся меньше их истинных значений. Такой подход считается оправданным, если оценка роли граничных условий сложна и дорога. В условиях длительной эксплуатации построенные графики $S - \lg t$, как правило, отражают влияние большинства границ. В отдельных случаях некоторые из таких границ (гидрогеологические окна, мелкие ручьи и так далее) не могут существенно изменить характер закона снижения уровня и поэтому прогнозные оценки делаются по конечным прямым графиков прослеживания, т. е. с учетом границ. В тех случаях, когда границы существенно изменяют расчетные параметры, необходимо внесение в них соответствующих корректур, и прогнозные оценки могут выполняться по таким обобщенным параметрам без учета границ. Во всех случаях критерием правильности выбора расчетной схемы и расчатных параматров должно быть сопоставление рассчитанных и фактически измеренных дебитов или понижений за предшествующий период наблюдений. Применение гидравлического или, вернее, эмпирического метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод наиболее эффективно на основе анализа опыта работы водозабора, когда определение расчетных параметров и граничных условий не может быть сделано с достаточной достоверностью.

В случаях, когда зависимость дебита и понижения от времени близка к линейной, т. е. $S/Q \approx \text{const}$, водозабор может работать неограниченно долго при достигнутом размере водоотбора. Дальнейшее увеличение водоотбора может нарушить характер этой связи и поэтому обоснование возможности увеличения водоотбора должно основываться на доказательстве сохранения граничных условий при новом водоотборе. Если это сложно, то необходимо произвести расчеты понижений уровней при планируемом водоотборе в вариантах возможного изменения характера связи, а в процессе наращивания водоотбора установить эмпирически, по какому закону будет развиваться понижение. Подобные контрольные расчеты не

обязательно выполнять на какой-то конечный этап эксплуатации. Они могут быть сделаны на один-три года вперед. В ряде стран вообще считают целесообразным выполнение главным образом таких сравнительно краткосрочных прогнозов (на один-два года не более), которые позволяли бы оперативно управлять режимом эксплуатации подземных вод и искусственного их восполнения. Это, однако, не исключает необходимости долгосрочного прогнозирования в целях планирования системы водоснабжения в отдаленной перспективе. Среди эмпирических приемов определения возможного оптимального водоотбора при неравномерном питании подземных вод может рассматриваться и такой, как производство максимально мощного водоотлива в межень с целью определения емкостных характеристик водоносного горизонта ниже базиса дренирования. Оптимальный минимальный водоотбор $Q_{опт}$ в этом случае определяется по формуле

$$Q_{опт} = Q_{min} + V/t, \qquad (5.40)$$

где Q_{min} — минимальная величина разгрузки подземных вод, приведенная к году 95 %-ной обеспеченности или какой-то другой оптимальной обеспеченности; V — объем осушенной емкости; t — продолжительность маловодного периода.

Подобный прием применяется в ЧССР [46] в карстовых районах, где минимальные годовые дебиты родников почти в десять раз меньше максимальных годовых. Сработка емкости в маловодный период позволяет почти в два раза увеличить водоотбор по сравнению с минимальной естественной разгрузкой подземных вод. Опыт эксплуатации позволяет определить характерные для каждого типа месторождений подземных вод обобщенные показатели эксплуатационных запасов подземных вод, текие как модуль эксплуатационных запасов подземных вод и удельный дебит водозабора. Площадной модуль эксплуатационных запасов $M_{эп}$ (в л/с · 1 км^2) определяется по формуле: $M_{эп} = Q_c/F$, где Q_c — суммарный водоотбор на конечный этап эксплуатации подземных вод водозабором; F — площадь воронки депрессии.

Для водозаборов, располагающихся в долинах рек, обычно оценивается линейный модуль эксплуатационных запасов подземных вод $M_{эл} = Q_c/L$, где L — длина водозабора, км. Удельный дебит водозабора $q_в$ оценивается как $q_в = \dfrac{Q_c}{S_{max}}$, где S_{max} — понижение в центре водозабора при максимальном водоотборе Q_c. Характеристики $M_{эп}$, $M_{эл}$ и $q_в$ используются для приближенных прогнозных оценок возможного водоотбора на перспективных участках, расположенных в аналогичных гидрогеологических условиях, а также для картирования прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод [37]. При этом по аналогии с изученным водозабором на перспективном участке можно качественно охарактеризовать источники формирования эксплуатационных запасов подземных вод, оценить порядок возможных расчетных параметров, обосновать расчетную схему и виды необходимых исследований. Данные по водозаборам-аналогам служат также дополнительным подтверждением типичности получен-

ных при разведке значений параметров, их изменчивости по глубине, степени гидравлической связи эксплуатируемого водоносного горизонта со смежными и с поверхностными водами. Подобное дополнительное подтверждение близости к истинным принятых расчетных параметров и условий важно в районе со сложными гидрогеологическим строением, когда всегда возникают сомнения и в правильности принятой расчетной схемы и полученных разведкой исходных данных.

ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Как уже отмечалось выше, одной из важнейших задач изучения режима подземных вод на водозаборах является изучение и прогноз возможного ухудшения качества подземных вод под влиянием их эксплуатации.

Не останавливаясь на вопросах выявления источников загрязнения, путей попадания загрязнений в поверхностные, почвенные и затем в подземные воды, определения мер борьбы по предотвращению распространения загрязнений, рассмотрим лишь вопросы, связанные с изучением режима и прогнозом качества подземных вод в районах водозаборов. Среди них основными являются вопросы выявления загрязнений, слежения за их распространением, прогноза времени возможного подтягивания загрязненных вод, оценки процессов самоочищения загрязненных вод в процессе их фильтрации и обоснования гидрогеологических мер по предотвращению подсоса водозабором загрязненых или некондиционных природных вод.

Наиболее часто встречающимися видами загрязнений на водозаборах являются бактериальное (связанное с бытовыми отходами), химическое (с промышленными отходами, от сельскохозяйственной деятельности), природными солеными водами и нефтепродуктами. Бактериальное загрязнение попадает в водоносный горизонт с поверхности земли и из поверхностных вод. В зоне аэрации идут процессы самоочищения воды от бактерий, которые протекают особенно интенсивно в пористой среде. Установлено, что слой мелкозернистых песков в 5 метров способен полностью обезвредить воду от анаэробных бактерий. Сроком выживания бактерий считают 200 сут. Поэтому, рассчитав скорость фильтрации воды, можно установить способность загрязненных вод достичь водозабора. На инфильтрационных водозаборах по наблюдательным скважинам уже на стадии детальной разведки можно эмпирически определить самоочищающую способность зоны между рекой и водозабором. Если последняя оказывается недостаточной, то можно или сдвинуть линию водозабора, или планировать обеззараживание (хлорирование) воды в процессе эксплуатации. Обычно предусматривается последнее. Химическое загрязнение более опасно, так как процессы самоочищения в большинстве случаев отсутствуют или лимитируются сорбционной способностью грунтов, которая не безгранична. Лишь некоторые виды загрязнений, такие как фосфорные удобрения, хорошо задерживаются почвой.

К загрязнителям относятся и природные минерализованные воды, подтягивание которых снизу или по пласту способно вывести водозабор из строя. При возможности ухудшения качества подземных вод на водозаборах обычно решаются две задачи: определение возможности и времени подтягивания некондиционных вод к водозабору; определение концентрации смешения вод (т. е. соответствия требованиям ГОСТ-2874—82). Этим вопросам посвящено много работ [3, 10, 16 и др.].

В настоящее время рассмотрены различные гидродинамические модели миграций загрязняющих веществ в подземных водах — поршневая, микродисперсная, гравитационно-конвективная, упорядоченной и неупорядоченной гетерогенности. В них учтены особенности фильтрационных потоков в зависимости от граничных условий горизонта, дисперсия границы раздела жидкостей различного состава, различие их плотностей, диффузионный переток в разделяющие слои, блочность строения трещиноватости вмещающих отложений и т. д. Однако наиболее жесткой схемой развития загрязнений, создающей максимально благоприятные условия для миграции загрязнений, является поршневая. По ней обычно и проводятся оценки возможности подтока к водозабору некондиционных вод. В соответствии с этой моделью время T подтягивания некондиционных вод к водозабору сбоку в неограниченном пласте определяется по формуле

$$T = \frac{\pi n_0 h x_0^2}{Q}, \tag{5.41}$$

где n_0 — пористость пласта; h — средняя мощность пласта; x_0 — кратчайшее расстояние от водозабора до фронта некондиционных вод; Q — дебит водозабора.

Скорость продвижения загрязненных вод в условиях бассейна при неустановившемся режиме фильтрации определяется по формулам:

$$v_д = \frac{Q}{2\pi n_0 hr} \left| e^{-\frac{r^2}{4at}} \right. \tag{5.42}$$

или при $t \to \infty$ и $\left| e^{-\frac{r^2}{4at}} \right. \to 1$

$$v_д = \frac{Q}{2\pi n_0 hr}, \tag{5.43}$$

где r — расстояние от водозабора до точки измерения качества воды; t — время от начала откачки; a — коэффициент пьезопроводности (или уровнепроводности).

Получены соответствующие зависимости для определения T, $v_д$ и для других граничных условий и различных схем неоднородности пласта [2, 10]. В условиях работающего водозабора, когда средняя мощность пласта может уменьшиться и достоверные сведения о пористости пласта

отсутствуют, изменения скорости и времени подтягивания некондиционных вод определяются эмпирически по данным наблюдений за режимом химического состава подземных вод.

Изменение во времени t, концентрации смешения воды C_t, отбираемой водозабором при достижении некондиционных вод водозабора, определяется по формуле: $C_t = C_0 + \frac{C - C_0}{\pi} \arccos\sqrt{\frac{T}{t}}$, где C и C_0 — концентрации отдельных компонентов или общая минерализация некондиционных и кондиционных вод. Для прогноза изменений C_t следует определять и уточнять периодически величину T, а также возможную изменчивость концентрации некондиционных вод за счет процессов самоочищения (распада, сорбции, окисления, диффузии, химического взаимодействия загрязняющих веществ с подземными водами и вмещающими породами, поглощения и разложения загрязняющих веществ и т. п.).

Учесть все эти факторы в совокупности ни в лабораторных экспериментах, ни в теоретических построениях практически невозможно. Поэтому изучение процессов миграции загрязняющих веществ в подземных водах наиболее эффективно строить на данных реальных наблюдений в природе. В процессе наблюдений можно также уточнить роль фильтрационной неоднородности, перетекания и влияния взаимодействия системы загрязнения вода—порода на структуру порового пространства и фильтрационные свойства пород и других гидрогеологических факторов.

Аналогичные вопросы решаются и при подтягивании некондиционных вод снизу. Так, время T подтягивания (поступления первых порций) некондиционных вод снизу в наиболее распространенном случае, когда мощность некондиционных (соленых) вод значительно больше, чем пресных, определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi n_0 h_к^3}{3Q}, \qquad (5.44)$$

где $h_к$ — средняя мощность кондиционных вод.

В пластах небольшой мощности, соизмеримой с глубиной вскрытия пласта эксплуатационными скважинами

$$T = \frac{2\pi n_0 (h_к - C)^3}{3Q\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}, \qquad (5.45)$$

где l — длина фильтра; β — коэффициент несовершенства вскрытия.

Коэффициент β можно определить в зависимости от величины l/H, где H — мощность водоносного горизонта:

$\frac{l}{H}$	0,05 — 0,10	0,1 — 0,2	0,2 — 0,4	0,4 — 0,6	0,6 — 0,8
β	2	1,7	1,4	1,3	1,1

Минерализация откачиваемой воды на любой момент времени t после начала подтягивания соленых вод определяется по формуле

$$C_t = C - (C - C_0)\sqrt[3]{T/t}. \qquad (5.46)$$

Предельная концентрация смешения в однородном пласте составит

$$C_{t\max} = C - (C - C_0)\frac{h_к}{H}. \qquad (5.47)$$

Систематические наблюдения за режимом химического состава подземных вод и скоростями продвижения загрязнений дают возможность уточнить расчетные гидрогеологические параметры и прогнозы изменения качества подземных вод во времени по указанным выше зависимостям. На водозаборах могут встретиться три случая изменения качества воды (по В.М. Гольдбергу) : полное засоление (загрязнение), частичное и убывающее. Под полным засолением, или загрязнением, понимается такое, при котором вода, отбираемая водозабором, становится абсолютно не пригодной для питьевых целей. При частичном засолении качество воды ухудшается, но она остается пригодной для питьевых целей. Убывающее засоление отмечается в случаях, когда источник засоления локален (например, зона частичной разгрузки подземных вод в тыловых частях террас). После подтягивания вод из этого источника происходит временное ухудшение качества воды, после чего наблюдается вновь опреснение вод на водозаборе. Это определяется тем, что или балансовая составляющая эксплуатационных запасов подземных вод, формирующаяся под влиянием процессов засоления, несоизмеримо меньше других источников восполнения, или эти процессы вообще прекращают свое существование в результате снижения уровней и снятия испарения. В результате установленной расчетами возможности полного засоления (загрязнения) подземных вод с учетом уточненных по данным конкретных наблюдений расчетных параметров разрабатываются меры по устранению угрозы засоления.

1. Регулируя размеры водоотбора и расположение скважин на водозаборе при наличии четко выраженного потока подземных вод в естественных условиях, можно добиться водораздела уровней между зоной загрязнения и водозабором. Для этого по построенным эмпирическим или смоделированным картам гидроизогипс при каждом варианте реального водоотбора строятся линии токов, по которым можно убедиться в образовании водораздела или разделяющей линии токов между источником загрязнения и водозабором (см. рис. 6). Водораздельная точка вниз по потоку в неограниченном пласте устанавливается на расстоянии x_A при условии:

$$x_A = \frac{Q}{2\pi h v_e}, \qquad (5.48)$$

где Q — расход водозабора; h — мощность водоносного горизонта на линии водозабора; v_e — скорость потока подземных вод в естественных условиях (до начала эксплуатации).

Нейтральная линия расположится на линии водозабора и вдали от него на расстояниях соответственно $\pm y_0 = \frac{Q}{4\pi v_e}$ и $\pm y = \frac{Q}{2\pi v_e}$ от линии тока, проходящей через центр водозабора.

В условиях полуограниченного пласта с контуром постоянного напора на границе, когда поток в естественных условиях направлен от реки и контур засоленных вод находится параллельно реке в сторону водораздела (в долинах среднеазиатских рек), водораздельная точка будет находиться на расстоянии $x_A = d\sqrt{\frac{Q}{\pi dqb}} - 1$, где d — расстояние водозабора от реки; $q = kh_{ср} = Y$ — единичный расход естественного потока. Нейтральная линия тока на границе с постоянным напором расположится на расстояниях $\pm y_0 = 2\sqrt{\frac{Qd}{\pi q_e}}$ от центра водозабора.

Нахождение источника загрязнения (засоления) за пределами нейтральной линии тока исключит подтягивание некондиционных вод к водозабору.

2. В условиях подтока соленых вод снизу проводится одновременная их откачка. Дебит этой откачки устанавливается для однородного водоносного горизонта из соотношения $Q_н < \frac{Q_к m_н}{m_к}$, где $m_к$ и $m_н$ — мощности слоев с кондиционными и некондиционными водами; $Q_к$ и $Q_н$ — дебиты водозаборов, отбирающих кондиционные и некондиционные воды. В неоднородном горизонте соотношение дебитов определяется соотношением водопроводимости слоев $\frac{Q_к}{Q_н} \leqslant \frac{(km)_к}{(km)_н}$. Некондиционные воды должны отводиться за пределы расстояния x_0, откуда время их подтока к водозабору по пласту превышает расчетное время его работы.

3. В условиях, когда подток некондиционных вод к водозабору неизбежен и это приведет к полному засолению воды, проектируются барражные водозаборы, препятствующие продвижению некондиционных вод. Расположение таких барражных водозаборов может быть различным: а) в центре контура загрязнения для его стягивания и создания водораздела между воронками депрессии барражного и эксплуатационного водозаборов; б) между контуром загрязненных вод и водозабором вблизи контура с целью перехвата потока некондиционных вод и сброса их за пределы зоны влияния водозабора; в) закачка пресных вод между контуром соленых вод и водозабором (например, при подтягивании соленых вод со стороны моря). Во всех этих случаях необходимы систематические наблюдения за уровнями и за химическим составом подземных вод,

которые позволили бы оперативно управлять водоотбором на питьевом и защитном водозаборах с тем, чтобы своевременно контролировать эффективность принятых мер.

ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНАХ ВОДОЗАБОРОВ

Целенаправленная систематизация и обобщение данных наблюдений за режимом подземных вод позволяют не только наглядно представить условия, в которых работает водозабор, но и обосновать пути анализа исходного материала для целей переоценки запасов подземных вод, для прогноза режима качества и управления работой водозабора. Наиболее распространенными являются следующие виды графической обработки материалов.

1. Построение графиков понижения уровней по отношению к их статическому положению и изменения водоотбора во времени (рис. 30). При сосредоточенном водозаборе водоотбор показывается в виде суммарных среднемесячных и годовых значений дебита водозабора. Если же водозабор состоит из отдельных групп, то эти данные приводятся по каждой группе в отдельности. По графикам водоотбора проводится его схематизация с выделением ступеней или сглаженных кривых, используемых затем в прогнозных расчетах.

2. Составление графиков химического состава подземных вод в первую очередь по скважинам, расположенным ближе всего к контуру некондиционных вод с отражением на них как изменений во времени общей минерализации подземных вод, так и тех компонентов, концентрации которых могут измениться в результате ожидаемого подтягивания некондиционных вод.

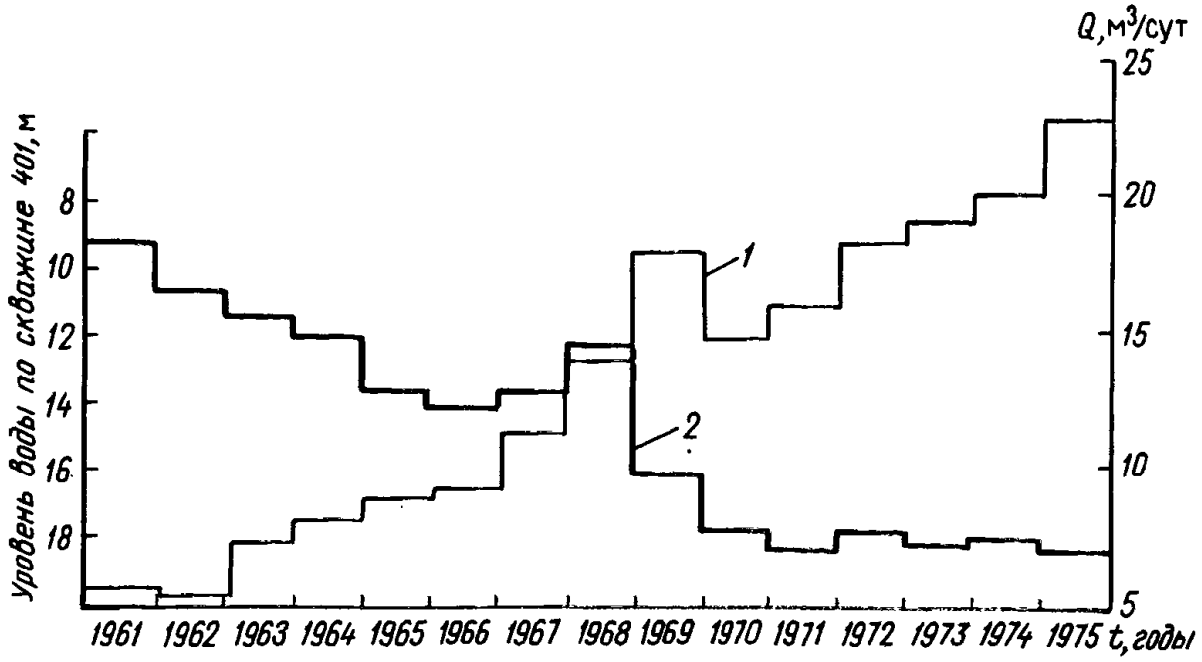


Рис. 30. Графики водоотбора (*1*) и понижения уровней подземных вод во времени (*2*) для одного из водозаборов Эстонии

3. В тех случаях, когда помимо водоотбора на режим подземных вод в зоне влияния водозабора оказывают воздействие и другие режимообразующие факторы (режим поверхностных водотоков, атмосферные осадки, температура воздуха, атмосферное давление и т. д.) в том же масштабе, как и для графиков режима уровней подземных вод, строятся графики по этим факторам. Такие графики помогают оценить роль различных источников восполнения запасов и учесть их в расчетах.

4. Построение графиков зависимости удельных понижений S/Q от времени, позволяющих оценить обеспеченность водоотбора восполнением и прогнозировать водоотбор или понижение экстраполируя график этой связи, а также серий графиков $S - \lg t$ и $S - \sqrt{t}$ или $S/Q - \lg t$ и $S/Q - \sqrt{t}$, позволяющие определить характер граничных условий, в которых работает водозабор с постоянным или переменным дебитом. Эти графики или, вернее, те из них, которые наиболее полно соответствуют природным условиям и условиям водоотбора, используются затем для определения расчетных параметров и дальнейших прогнозов.

5. При проведении оценок или переоценок запасов подземных вод методом моделирования целесообразно составление графиков изменения во времени доли участия различных составляющих в восполнении эксплуатационных запасов подземных вод. Такие графики лучше всего составлять в процентах от водоотбора. Они, помимо наглядности представлений о действующих на каждый момент времени источниках формирования запасов подземных вод, могут быть использованы для прогноза качества подземных вод по уравнениям концентраций смешивания. В ряде случаев подобные графики могут быть построены и на основе аналитических расчетов источников питания рассмотренными выше способами.

6. Составление серий карт гидроизогипс или гидроизопьез на отдельные характерные периоды эксплуатации. Эти карты, как было показано выше, используются для оценки расчетных параметров и питания подземных вод, изучения динамики потока и подтверждения наличия нейтральной линии и водораздельных точек между водозабором и источником загрязнений, выявления взаимодействия между водозаборами, оценки времени достижения воронкой депрессии границ пласта, определения модуля эксплуатационных запасов подземных вод, выявления вклада отдельных частей водозабора в формирование общей воронки депрессии и обоснования по этим наблюдениям схематизации водозабора как большого колодца или как серии взаимодействующих водозаборов, наглядного показа динамики контура некондиционных вод во времени и других целей.

7. Графические приемы обобщения данных наблюдений за режимом подземных вод могут использоваться и для прогнозов режима уровней подземных вод. В частности, наиболее грубые прогнозы могут строиться, как уже упомянуто выше, на основе экстраполяции графиков связи $S = f(Q)$ в условиях установившегося режима фильтрации. Известно, что если по геологическим и гидрогеологическим данным можно обосновать, что граничные условия не изменятся, то такой график может быть экстраполирован до 1,5—2,0 S (достигнутого понижения). В условиях изученно-

го режима подземных вод и уточненных по нему расчетных параметров и граничных условий эти прогнозы могут выполняться на основе аналитических расчетов или моделирования. Результаты такого прогноза режима подземных вод могут быть представлены как в виде графиков зависимостей понижений от времени (см. рис. 29), так и в виде прогнозных карт (гидроизогипс или пьезогипс на определенные даты) или в виде карт понижений.

При постоянном водоотборе для целей прогноза могут составляться также карты темпа снижения (или срезок) уровней (в м/год). По таким картам можно давать прогнозы, хотя и грубые, но отражающие представление о площадном влиянии эксплуатации на режим подземных вод территории. Карты срезок особенно важно составлять для районов, где подземные воды интенсивно используются, в результате чего все воронки депрессий между собой взаимодействуют. Такие карты в данном случае дают наглядную картину динамики эксплуатации, помогают установить участки, наиболее опасные с точки зрения истощения подземных вод эксплуатируемого водоносного горизонта и, кроме того, могут служить для ориентировочных расчетов прогнозного уровня по экстраполяции на небольшие промежутки времени (от года до трех лет). Для составления карт понижений или срезок должны быть использованы данные по всем существующим скважинам: наблюдательным, резервным, разведочным и эксплуатационным. Для сбора материалов по режиму уровней подземных вод могут быть произведены также разовые замеры по существующим, но не находящимся под наблюдением скважинам. Такие разовые замеры могут проводиться ежегодно. В ряде случаев для этой цели могут быть использованы даже старые ликвидированные наблюдательные скважины, по которым ранее было установлено соотношение понижений с понижениями в скважинах, расположенных в центре воронки депрессии или близ него. Как известно, в условиях напорных вод через определенный промежуток времени после начала работы водозабора наступает такой период, когда скорости снижения уровней подземных вод в возмущающих и реагирующих скважинах становятся практически одинаковыми. Установленные П.М. Гасс соотношения понижений в центре воронки депрессии и в наблюдательной скважине $\alpha = S_ц/S_н$ и $\alpha = S_н/S_ц$ через определенное время при квазистационарном режиме практически не меняются. Для того чтобы установить время наступления такого периода, необходимо построить по данным наблюдений или, зная параметры водоносного горизонта, расчетным путем график соотношения понижений для различно удаленных точек (рис. 31) и центром воронки депрессии. По графику можно определить не только с какого времени данное соотношение практически не меняется, но и процент ошибки, какую можно допустить, если принять это соотношение постоянным. Таким образом, установив соотношение понижений в центре воронки депрессии с какой-то другой точкой воронки (пусть даже по разовым наблюдениям), можно использовать в будущем это соотношение для установления размеров понижений в этой точке, зная лишь понижение в центре воронки или по какой-либо другой скважине, с которой такое соотношение было установлено. Основываясь на этом,

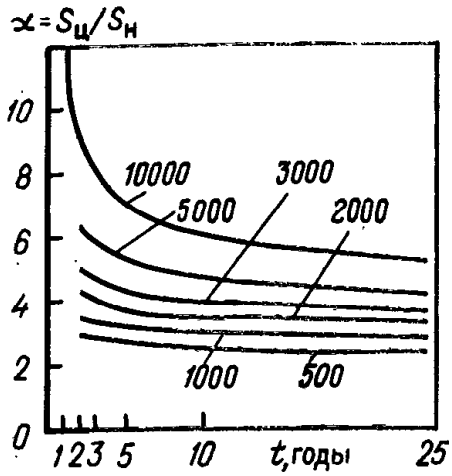


Рис. 31. Графики изменений во времени зависимости отношения понижений уровня в центре водозабора ($S_ц$) и понижения уровней в наблюдательных скважинах ($S_н$), отстоящих на различных расстояниях от водозабора при Q = 10000 м/сут, k = 20 м/сут, m = 20 м, $a = 10^3$ м^2/сут (по П.М. Гассу).

Цифры у кривых — расстояния от центра воронки депрессии до наблюдательной скважины, м

ряд наблюдательных скважин можно законсервировать или перенести на разряженный, сокращенный период наблюдений (например, раз в месяц).

8. Результаты пересчетов запасов подземных вод на основе полученных обобщенных или усредненных по водозабору параметров проверяются путем сопоставления рассчитанных по установленным вновь параметрам и граничным условиям понижений за предшествующий период с фактически наблюдавшимися понижениями уровней за это же время. На основе этих сопоставлений определяется средняя ошибка или погрешность прогноза

$$S_Δ = \frac{\Sigma (S_ф - S_р)^2}{n - 1}, \qquad (5.49)$$

где $S_ф$ и $S_р$ — фактическое и расчетное понижение за n лет.

В соответствии с установленной возможной ошибкой прогнозы допустимых понижений по этапам и на конечный срок эксплуатации лучше выдавать не в виде одного наиболее вероятного значения $S_ф$, а в виде $S_{ср} \pm$ $\pm S_Δ$. Важность комбинирования детерминированных и стохастических приемов в гидрогеологических расчетах вообще и при оценках запасов подземных вод в частности отмечались неоднократно и советскими, и зарубежными исследователями и даже была зафиксирована в решении симпозиума международных ассоциаций гидрогеологов и гидрологических наук по методам сбора и обобщения гидрогеологической информации, состоявшемся в 1983 г. в Нидерландах. Само понятие "прогноз" уже предусматривает вероятностный характер предвидения на какой бы методической основе он не выполнялся. Вероятностный характер прогнозов поведения уровней подземных вод в районе водозаборов, несмотря на детерминированность самого процесса и использование детерминированных расчетных уравнений, зависит от стохастического характера распределения фильтрационных свойств горизонта в зоне воронки депрессии, от вероятностного характера восполнения запасов (за счет инфильтрационного питания, переменного во времени поверхностного стока и снятия испарения). Не строго определена и хозяйственная деятельность, что отражается на стохастичности водоотбора. Наибольшей условностью отлича-

ется учет граничных условий во времени и в пространстве. Все это не позволяет быть уверенным, что расчетная схема и принятые для расчета параметры в полной мере адекватны природным условиям. Даже на основе анализа опыта эксплуатации, когда на какой-то момент времени удается получить обобщенные характеристики параметров и граничных условий, все элементы неопределенности и неоднородности всегда остаются на прогнозный момент времени. Даже при моделировании, когда казалось бы методом последовательных приближений можно подобрать модель достаточно адекватную природной, достичь высокой точности прогнозов практически невозможно. Опыт моделирования показывает, что адекватные модели всегда содержат серии систематических и случайных ошибок, связанных со схематизацией и дискретизацией модели, количеством и качеством исходной информации, ее интерполяцией и экстраполяцией, методами измерения, принятыми допущениями и т. д. [7]. Функциональные (построенные на обобщенных параметрах) и инженерные (построенные на наиболее жестких схемах — расчетных и фильтрационных) модели могут реагировать на все изменения условий (уровней и расходов потока) так же, как в природном объекте, и гарантировать надежность решения, но в то же время быть далекими от реальных природных условий и не быть достоверными, давать не точные результаты прогнозов — с слишком большим запасом прочности. Поэтому при моделировании следует определять погрешности различных видов, допускаемых при построении моделей и проводимых на ней прогнозов [7]. Они оцениваются и по каждому элементу в отдельности и в сумме

$$\epsilon_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \epsilon_i^2}, \qquad (5.50)$$

где ϵ_i — точность оценок или погрешность по каждому использованному в расчетах фактору или параметру.

Влияние допущенных погрешностей на конечный итог моделирования оценивается факторно-диапазонным анализом и решением серии обратных задач, которые и позволяют оценить возможный разброс прогнозных значений. В условиях гарантированного восполнения (например, при подпертом режиме фильтрации у реки с расходом, много превышающим водоотбор) или в случаях, когда допустимое понижение намного меньше величины напора или мощности пласта, возможные ошибки в расчетах могут и не привести к нежелательным последствиям и поэтому их определение может не иметь реального практического интереса. Однако в условиях напряженного восполнения и лимитированных емкостных возможностей водоносных горизонтов подобные оценки будут иметь очень большое значение. Во всех же случаях оценки достоверности и точности прогнозов представляют методический интерес. Помимо оценки возможной ошибки расчетов по формуле (5.67) для каждого из видов прогнозов (уровней, качества и других) могут быть оценены диапазоны наиболее возможных вариаций основных расчетных параметров статистическим анализом данных и по ним произведены дублирующие расчеты для минимальных

(направленных по прогнозируемой характеристике в одну сторону), максимальных и средних значений параметров. Выбор таких диапазонов изменений параметров можно осуществить, например, по графикам распределения частот каждого параметра.

9. Для получения представлений о влиянии границ на развитие понижений уровня вблизи контуров водоносного пласта в целях уточнения расчетной схематизации условий целесообразно построение гидрогеологических разрезов перпендикулярно к основным границам или вдоль и вкрест потока подземных вод. На таких разрезах показывается положение уровней на отдельные этапы эксплуатации подземных вод.

10. При производстве оценки или переоценки запасов подземных вод методом моделирования строятся карты водопроводимости эксплуатируемого водоносного горизонта и мощностей разделяющих слоев. Для этого используются данные опробования водоносного горизонта в период съемочных и разведочных работ по площади, а также данные опыта эксплуатации. Решая обратную (инверсную) задачу, эта карта корректируется, т. е. определяются и картируются данные по коэффициентам фильтрации разделяющих слоев и перетекание через них.

Глава 6

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКУЮ ОБСТАНОВКУ И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Подземные воды являются составной частью гидросферы Земли и окружающей нас среды. Нарушение равновесия в любой из частей сформировавшейся системы не может не сказаться на ней в целом. Эксплуатация подземных вод приводит нередко к существенным нарушениям в подземных и поверхностных водах, в геологической среде и в экологической обстановке. Не учет этих нарушений, отсутствие предвидения их появления и масштабов возможных последствий может привести к существенному экономическому ущербу и даже к нежелательным социальным последствиям. Поэтому одной из важнейших задач современной гидрогеологии является изучение и прогноз влияния хозяйственной деятельности и эксплуатации подземных вод на окружающую среду. Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных последствий эксплуатации подземных вод и пути их прогнозирования.

ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ, РЕЖИМА И БАЛАНСА ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Эксплуатация подземных вод прежде всего нарушает режим и баланс подземных вод. Снижение уровней грунтовых вод, как было показано в гл. 4, меняет инфильтрационное питание подземных вод и испарение с поверхности грунтовых вод, а это прямо сказывается на характере внут-

ригодовых колебаний уровней подземных вод и, следовательно, на естественном восполнении их запасов. Прогноз этого явления, как было показано выше, возможен на основе установленных зависимостей основных элементов баланса подземных вод от глубины их залегания (см. рис. 25) и на основе экстраполяции нелинейных трендов по минимальным годовым, среднегодовым и максимальным годовым значениям уровней подземных вод. Подобная задача может быть решена и методом моделирования. Изменения взаимосвязи водоносных горизонтов при эксплуатации вызывают не только перетекание, но и меняют внутригодовой режим напорных горизонтов, так как перетекание как расход поступления воды сверху (особенно из грунтовых вод) в напорный горизонт меняется по сезонам года. Эти колебания, говорящие о сезонном питании напорных вод, измеряются обычно первыми десятками сантиметров и несоизмеримы с величинами напоров, достигающих иногда десятка метров, а поэтому чаще всего не принимаются во внимание при расчетах. Однако в многолетнем разрезе эти сантиметры складываются и дают уже метры, на которые фактические снижения уровней на водозаборе обычно оказываются выше расчетных (выполненных без учета питания). В этом также кроется резерв возможного увеличения производительности водозаборов, работающих в напорных горизонтах и имеющих взаимосвязь с грунтовыми водами или вышележащими межпластовыми водоносными горизонтами. С ростом воронки депрессии величины такого питания со временем стабилизируются (в ограниченных пластах) или несколько растут. Поэтому по данным наблюдений за режимом подземных вод на водозаборах можно установить изменчивость амплитуд колебаний уровней подземных вод во времени и прогнозировать поведение их уровней не только с учетом установленного сезонного питания, но и с учетом закономерности возможной его изменчивости. В тех случаях, когда амплитуды колебаний уровней напорных вод в процессе эксплуатации возрастают, можно ожидать стабилизацию или уменьшение темпа снижения уровней подземных вод. Естественно максимальный эффект в изменчивости снижения уровней грунтовых вод следует ожидать вблизи самого водозабора в зоне основного восполнения (перетекания), если оно не повсеместно. Эксплуатация подземных вод, как уже отмечалось, приводит: к осушению водоносных пластов или снижению напоров в них на 20—170 м, которое прослеживается на площадях в десятки и даже сотни квадратных километров; к превращению областей питания водоносных горизонтов в область их разгрузки, в том числе к сокращению разгрузки подземных вод в реки, исчезновению родников, изменению направлений потоков подземных вод, снятию скрытой разгрузки подземных вод на испарение. Все эти последствия приводят к переформированию источников восполнения запасов подземных вод и изменению не только водного, но и солевого баланса подземных вод. Так, при эксплуатации отмечается подтягивание контура солоноватых вод в разрезе и в плане, привлечение соленых или другого состава морских или грунтовых вод, что может полностью изменить химический тип воды в водоносном горизонте. Возможные прогнозные оценки этих явлений рассмотрены выше и в других работах. В том числе прогнозы изменения качества

подземных вод рассмотрены в работах [2, 10 и др.]. Неоднократно отмечалось изменение и температурного поля подземных вод (в Москве, Киеве и других городах). Таким образом, эксплуатация подземных вод значительно, а иногда и практически полностью изменяет условия их формирования. Прогноз этих изменений возможен, а следовательно, можно оценить масштаб последствий и в случае необходимости снизить нежелательные эффекты, наметить своевременно природоохранные меры (о чем будет сказано ниже).

ИЗМЕНЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Водозаборы инфильтрационного типа являются одними из наиболее распространенных у нас в стране и за рубежом. Они протягиваются вдоль рек, озер и водохранилищ иногда на километры и отбирают сотни кубометров в сутки. Эксплуатация подземных вод нарушает и видоизменяет взаимосвязи поверхностных и подземных вод. В тех случаях, когда поверхностные воды служат областью разгрузки подземных вод, эта разгрузка резко сокращается за счет перехвата части подземного стока водозабором или полностью прекращается. При этом область разгрузки превращается в область питания. Если же областью питания являются поверхностные воды (в пустынных и полупустынных районах или в районах верховых болот), то это питание интенсифицируется. Во всех же случаях водоотбор из водоносных горизонтов, имеющих гидравлическую взаимосвязь с поверхностными водами, приводит к изменению ресурсов поверхностных вод. Величина потерь речного стока на любой момент времени, по М.С. Хантушу, может быть определена по формуле

$$V_{\text{ущ}} = 4Qti^2 \operatorname{erfc}\left(\frac{d_0}{2\sqrt{at}}\right), \qquad (6.1)$$

где $V_{\text{ущ}}$ — суммарные потери речного стока за время t при водоотборе Q; d_0 — расстояние водозабора от реки; $i^2 \operatorname{erfc}(x)$ — специальная функция, значение которой при аргументе $x = \frac{d_0}{2\sqrt{at}}$ [11]. Е.Л. Минкиным [28] рассмотрены и получены зависимости для определения ущерба речному стоку для различных режимов эксплуатации. В долинах рек с расходами, намного превышающими производительность водозабора, оценка уменьшения речного стока практического значения не имеет. В долинах рек, где водозабор подземных вод соизмерим с расходом реки (при этом следует иметь в виду все водозаборы в бассейне реки), такие изменения требуется оценивать детально. Эксплуатация подземных вод может не только перехватить речной сток целиком, но и ухудшить экологическую обстановку в районе: нанести ущерб рыбному хозяйству, сенокосным угодьям в поймах рек, вызвать гибель влаголюбивой растительности, ухудшить санитарную обстановку, а также качество поверхностных и подземных вод. Перехват водозаборами подземных вод, дренируемых озерами, приводит к осушению или обмелению последних, повышению уровня их эвтрофи-

кации, снижению качества воды, потере их рекреационного значения. Дренирование болотных массивов также вызывает ряд негативных последствий — обогащение подземных вод органикой, железом, марганцем, азотистыми соединениями (за счет процессов окисления органики), повышением кислотности подземных вод. Возрастает вероятность пожаров за счет самовозгорания торфов, снижается меженный сток рек. Высокая загрязненность поверхностных вод приводит к загрязнению и подземных вод. Может произойти осушение озер, имевших рекреационное значение. При предполагаемом значительном уменьшении речного стока особенно важно согласовать величину планируемого водоотбора с санитарными органами, определить размеры санитарного стока или санитарных попусков для оздоровления обстановки в долинах рек. Следует отметить существующие неверные представления о том, что любой водоотбор подземных вод неизбежно скажется на поверхностном стоке в эквивалентных размерах. Здесь надо иметь в виду два момента: 1) чем дальше от реки расположен водозабор и чем хуже гидравлическая связь горизонта с рекой, тем меньше будет снижен расход поверхностного стока и тем через большее время водоотбор проявится на речном стоке в реальных масштабах; 2) при эксплуатации подземных вод появляются и другие факторы, такие как перехват глубинного стока, снятие испарения, сброс возвратных вод в реку, которые в значительной мере, а иногда и полностью исключают влияние водоотбора на поверхностный сток. Кроме того, помимо негативных последствий необходимо оценивать и позитивные стороны эксплуатации подземных вод в долинах рек, которая позволяет зарегулировать (задержать) поверхностный сток в районах с напряженным водным балансом, снизить непродуктивное испарение с поверхностных и подземных вод, улучшить качество перехватываемых поверхностных вод, повысить урожайность луговых трав на ранее подтопляемых землях.

ПРОСАДКИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Данное явление, формирующееся под влиянием интенсивного водоотбора, а также эксплуатации нефти и газа, известно уже давно и достаточно хорошо изучено во многих странах: СССР, Японии, США, Мексике, Италии, Нидерландах, Англии. Его описанию посвящены многочисленные работы советских и зарубежных исследователей. Обзор этих работ проведен А.А. Коноплянцевым и Е.Н. Ярцевой-Поповой [24]. Оседание земной поверхности вызывается изменениями состояния как водовмещающих, так и разделяющих слоев. Снятие взвешивающего гидростатического давления воды приводит к увеличению сил тяжести и возрастанию эффективного давления слоев, что вызывает уплотнение рыхлых пород и приводит к оседанию земной поверхности. Изменение давления на пласт может быть рассчитано по формуле

$$\Delta p = (\delta - \delta_h)\, h \cdot 0{,}1, \qquad (6.2)$$

где Δp — приращение движения на скелет породы, Па; δ — объемная масса породы до водопонижения; δ_h — то же, при снижении уровня на величину h.

Например, при увеличении понижения уровня от 10 до 100 м давление на скелет породы может возрасти примерно в 10 раз (от 0,08 до 0,8 МПа). Размеры оседания пород и изменения давлений на скелет зависят от степени их сжимаемости и величины водопонижения. Наибольшие осадки дают глинистые, суглинистые и сапропелевые породы, особенно когда эти отложения молодые по возрасту, рыхлые, гидрофильные и водонасыщенные. Чем более вязки и менее водопроницаемы глины, тем медленнее идет процесс уплотнения. Переслаивание таких пород с песчаными и гравийно-галечными, которые мало сжимаются, но способствуют быстрому отводу воды (дренированию) толщи при эксплуатации, ускоряет процесс оседания. Скальные породы (песчаники, известняки), т. е. породы с высоким структурным сцеплением, практически несжимаемы и осадок не дают. Интенсивность процесса оседания земной поверхности зависит от ряда факторов, главным образом от типа водозабора и гидрогеологических условий района (степени дренированности, состава и мощности сжимаемых толщ, разности напорных градиентов и т. д.). В результате размеры оседания в различных районах могут быть разными. Учитывая это, в каждом конкретном случае должна быть определена необходимость организации специальных наблюдений за оседанием земной поверхности. В мировой практике известно много случаев оседания земной поверхности под влиянием водоотбора, достигающих иногда катастрофических размеров. В прибрежных районах в результате оседания затапливаются пониженные участки, подтапливаются города, разрушаются здания и сооружения. Неравномерная осадка приводит к нарушению подземных коммуникаций, железных дорог, к перекосу и разрушению зданий, мостов и других сооружений.

Скорость оседания поверхности составляет в г. Токио 18 см/год, в Мехико — 24, в г. Ниагата — 50, в г. Лонг-Бич — до 75, а в г. Осака на некоторых участках достигала рекордных размеров — 2,2 м в год. Исследованиями в Техасе установлено, что объем оседания составил около 22 % от объема откаченной воды, заключенной в глинистых породах.

Изменения упругого состояния пород начинается с эксплуатируемого водоносного горизонта и постепенно развивается в вышележащие разделяющие слои, вызывая снятие гидростатического давления в них и осушение, определяющее просадки. Известно, что уплотнить полностью водонасыщенный грунт можно лишь отжав из него часть воды и поэтому уплотнение пород связывается с их осушением. Уплотнение обычно осуществляется за счет более плотной укладки в породе слагающих ее частиц, т. е. сопровождается неизбежным взаимным перемещением частиц, что и определяет частичную необратимость таких деформаций. При уплотнении глинистых пород слагающие их частицы сближаются, что приводит к повышению молекулярных сил и сил внутренней связности. Это, с одной стороны, также определяет необратимость деформаций, а с другой — увеличивает количество связанной воды, т. е. приостанавливает процесс осушения глин и, следовательно, процесс просадок. Этим объясняется и тот факт, что резкое сокращение водоотбора в период второй мировой войны и предпринимаемые, например в Японии, меры по снижению процесса проседания

земной поверхности за счет ограничения эксплуатации подземных вод приводили лишь к частичному восстановлению уровней земли. Тем не менее многолетние наблюдения за этим явлением показывают, что при увеличении водоотбора темпы снижения поверхности земли увеличиваются и, наоборот, при уменьшении — замедляются. Таким образом, до тех пор пока упругие деформации не перешли в пластические и не произошло отжатие воды из глин, этот процесс может быть частично обратимым. Например, в долине р. Сан-Хоакин в Калифорнии эксплуатация подземных вод и нефти привела к снижению поверхности земли на 8,8 м при темпе снижения до 0,5 м/год. Восстановление же пьезометрических уровней до их статического положения в 1976 г. привело к затуханию процесса оседания. Поэтому во многих странах рассматриваются различные мероприятия по предотвращению дальнейшего опускания земной поверхности путем сокращения водоотбора, искусственного восполнения запасов подземных вод, нагнетания сжатого воздуха для поддержания пластового давления в водоносных горизонтах и т. д.

Все указанное подтверждает необходимость изучения этого явления, тесно связанного с эксплуатацией подземных вод, особенного в условиях, если водозабор близко расположен к городским территориям, а водовмещающие их водоупорные или слабопроницаемые породы представлены рыхлыми отложениями. Разрабатываются методы прогнозов возможных осадок, основанные на численном решении дифференциальных уравнений плановой неустановившейся фильтрации и уравнений деформаций поверхности глинистых грунтов, рассматриваются модели просадок.

Как показали выполненные эпигнозные расчеты, процесс просадок прогнозируется. Это позволило американским ученым составить такие прогнозы до 2000 г. и обосновать необходимые меры по поддержанию пластовых давлений для предупреждения и стабилизации данного процесса. На основании данных расчетов в Японии составлены карты возможного развития просадок земной поверхности.

АКТИВИЗАЦИЯ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Выполняемые длительные стационарные наблюдения за режимом подземных вод и инженерно-геологическими процессами показывают, что интенсивная эксплуатация подземных вод в водоносных горизонтах, подверженных карстообразованию, активизирует карстовые процессы. Это в свою очередь приводит к нарушениям в окружающей среде — образованию новых провалов, потерям речного стока, изменениям качества подземных вод. Особенно важно изучение этих явлений на урбанизированных территориях, где сочетание различных техногенных факторов способствует ускоренному развитию карста. Для таких районов представления о медленном, измеряемом в геологических масштабах времени, развитии карстовых процессов оказываются не точными. Практика показывает, что в этих условиях новые провалы земной поверхности могут появиться через несколько десятилетий там, где карстовые формы в современное время практически не образовывались и существовали в основном в отдаленные

геологические эпохи. Интенсивный водоотбор приводит к вымыванию глинистого материала, заполнявшего древние карстовые формы, что способствует провалам в них вышележащих рыхлых отложений. Таким образом, карстовые процессы сопровождаются здесь суффозионными, что усиливает суммарный эффект водоотбора на среду.

Интенсивный водоотбор создает не только гидродинамическую, но и температурную и гидрохимическую аномалии, обусловленные вовлечением в воронку депрессии грунтовых, речных и техногенных вод часто высокоагрессивных, имеющих иной химический состав и температуры по сравнению с водами эксплуатируемого водоносного горизонта. Смешение вод, даже ранее не агрессивных, различного состава и температуры может привести к нарушению карбонатного равновесия. Процесс усиливается при привлечении агрессивных речных и техногенных вод, при резком возрастании скоростей фильтрации и при повышении температур. Так, интенсивный водоотбор в центральной части Московского артезианского бассейна привел к увеличению градиентов фильтрации за время эксплуатации в 50—100 раз. По данным комплексной водно-гелиевой и тритиевой съемки, время водообмена в среднекаменноугольном водоносном горизонте сократилось в 85—100 до 5—10 лет [31]. Доля агрессивных грунтовых и речных вод в общем балансе эксплуатационного напорного горизонта возросла до 80 %. Это привело к "омоложению" напорных вод в районе воронки депрессии, что проявилось в резком увеличении в них концентраций трития, и наоборот — в уменьшении концентраций гелия вплоть до фоновых значений, характерных для поверхностных и атмосферных вод ($5 \cdot 10^{-5}$ мг/л). В сформировавшейся гидрохимической аномалии произошло увеличение концентраций всех основных компонентов состава вод (кальция, магния, гидрокарбонатов, хлоридов, сульфатов, окисляемости и общей минерализации), а также уменьшение величины pH с 8—8,2 до 7 и даже 5,6. Выполненные В.Л. Злобиной термодинамические расчеты показали способность подземных вод растворять карбонатные породы. Было также установлено, что некоторые виды загрязнений подземных вод способны играть роль катализатора, ускоряющего карстовые процессы. Так, по лабораторным определениям выщелачивание карбонатов в присутствии зольных вод, проникающих в водоносный горизонт в районах ТЭЦ, возрастает в 4—5 раз по сравнению с взаимодействием подземных вод только с агрессивными речными водами. Кислотность среды с увеличением доли зольных вод существенно растет, так же как и недонасыщенность раствора кальцием.

Осушение водоносного горизонта, а также повышение температуры подземных вод на 5—8 °С способствуют активизации в них развития органики и микроорганизмов, что приводит к увеличению содержания в воде органических кислот, также способствующих активизации карста. Косвенным свидетельством этому является снижение pH и резкое (в 2—3 раза, а местами в 10—12 раз) увеличение содержания в подземных водах кислорода (окисляемости). Наложение зон, аномально измененных под влиянием водоотбора, отдельных карстообразующих факторов (скоростей фильтрации, температур, гидростатического давления), загрязнений

(зольности, pH, окисляемости, содержания углекислоты) позволяет выделить участки максимально возможной активизации карстово-суффозионных процессов. Эффективным способом картирования зон потенциально возможной активизации карста служит гелиевая съемка [42]. Возможность быстрого и массового опробования, а также простота определения гелия, позволяют строить карты распределения аномалий гелия на различные периоды эксплуатации, а по развитию таких аномалий в пространстве и во времени судить о развитии зон возможного карстообразования. Сопоставимость аномалий гелия с зонами потенциальной возможности карстообразования обосновывается приуроченностью к аномалиям гелия аномалий практически всех основных карстообразующих факторов, а также наличием провалов земной поверхности.

Численный прогноз динамики развития карстового процесса в условиях водоотбора сложен и разработан пока слабо. Известны отдельные теоретические подходы к таким прогнозам [25], которые пока не реализованы для решения конкретных практических задач.

Для реализации, например, комбинированной модели Меркадо и других используются данные, характеризующие массоперенос, растворение и осаждение в системе вода—порода. Это — распределение пьезометрических напоров в рассматриваемом водоносном горизонте; значения водопроводимостей исследуемых карбонатных пород; данные по химическому составу напорных вод, включая концентрации кальция, магния, хлоридов, сульфатов, натрия, гидрокарбонатов. Для задания граничных условий реализуемой модели привлекаются данные по распределению температуры воды и величины PCO_2.

Изучение активизации карстово-суффозионных процессов представляет практический интерес не только в силу возможных нарушений в окружающей среде и связанным с ними материальным ущербом, но и в связи с возможной изменчивостью во времени расчетных параметров. Соизмеримость временных масштабов развития этих процессов с расчетным аммортизационным сроком работы водозаборов обязывает принимать данные явления во внимание и оценивать вероятную изменчивость параметров во времени. Карстовый и суффозионный процессы неизбежно должны привести к росту во времени пористости, водоотдачи и коэффициента фильтрации. Коэффициенты уровне- или пьезопроводности пласта могут при этом и расти и уменьшаться за счет нарушений в разделяющих пластах и возрастании роли перетекания. Аналитических приемов прогноза изменчивости параметров во времени пока не существует.

Наиболее реальные пути решения этой задачи связаны с моделированием. Так, решая обратные задачи по опыту эксплуатации и наблюдениям за режимом подземных вод, можно определить параметры для отдельных моментов времени, разделенных интервалом, например, в 5 лет. По этим данным можно установить эмпирическую зависимость изменчивости параметров во времени, экстраполировать ее в будущее и оценить характер развития понижений на расчетный срок эксплуатации уже с учетом прогнозных параметров. При отсутствии данных опыта эксплуатации для приближенного прогноза возможного изменения расчетных параметров В.А. Ба-

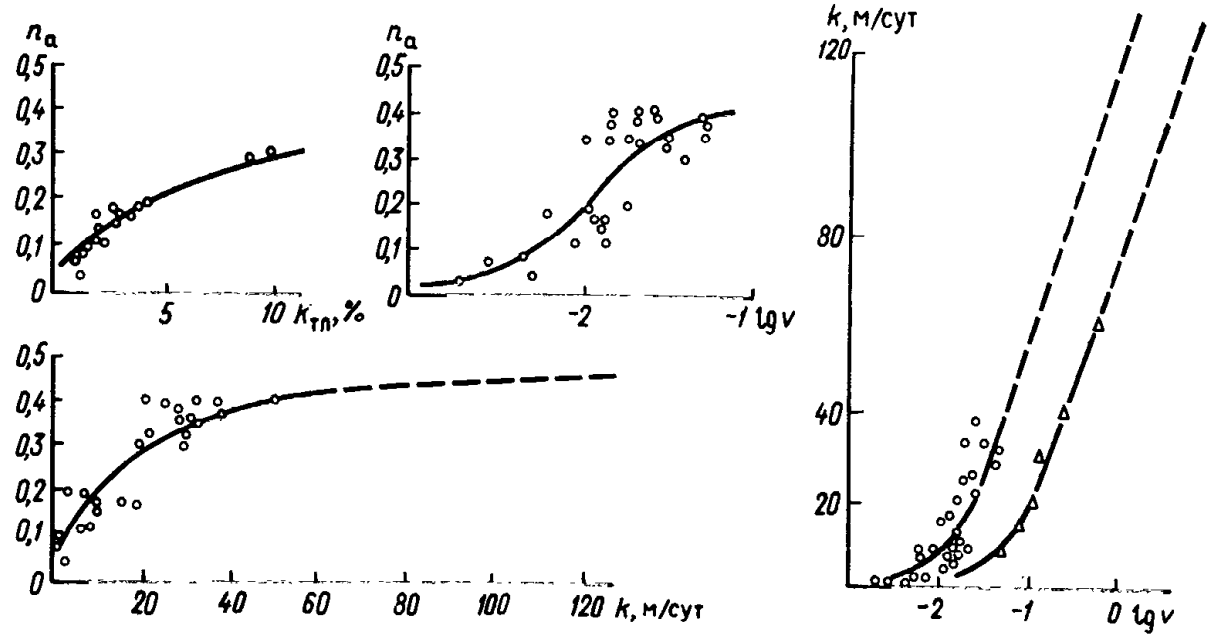


Рис. 32. Графики фильтрационных и емкостных свойств карбонатных отложений (по В.А. Барону)

роном предложено устанавливать существующие в естественных условиях зависимости между скоростями фильтрации подземных вод $v_ф$ и водно-физическими свойствами пород; активной пористостью n_a, трещинной пустотностью $k_{тп}$, коэффициентом фильтрации k, при допущении, что в нарушенных условиях эти закономерности сохранятся. Для этого, используя данные опытно-фильтрационных работ, проведенных в различное время и в различных условиях в пределах изучаемого района, строятся эмпирические зависимости (рис. 32) : $n_a = f(v_ф)$, $k = f(n_a)$ или $n_a = f(k_{тп})$. Из анализа этих графиков после их соответствующего усреднения и, если необходимо, экстраполяции, устанавливается корреляционная связь коэффициента фильтрации и скорости фильтрации $k = f(v_ф)$. Аналогичным образом может быть установлена корреляционная связь $\mu = f(v_ф)$. Затем на основе решений прогнозной задачи при исходных водно-физических свойствах массива и заданных граничных условиях находится поле скоростей. Используя эти прогнозные значения скоростей, с графика связи $k = f(v_ф)$ снимаются прогнозные значения коэффициентов фильтрации и проводится пересчет прогнозной задачи с учетом новых значений k. По результатам этого расчета вновь уточняются возможные скорости, снова вносится корректура в k и т. д. Практически стабильный результат получаетя на четвертом—шестом приближении, по В.А. Барону. Данный прием не учитывает многофакторности процесса карстообразования и скоростей развития карстового процесса, возможного изменения состава вод при эксплуатации и т. д. Поэтому может оказаться, что изменения коэффициента фильтрации под влиянием изменяющихся скоростей фильтрации под влиянием изменяющихся скоростей фильтрации произойдут за пределами расчетного срока работы водозабора. Однако такие прикидочные оценки целесообразно производить, так как они позволяют оценить порядок воз-

можных изменений в эксплуатационных запасах подземных вод, которые может внести активизация карстово-суффозионного процесса под влиянием интенсивного водоотбора подземных вод.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВОДООТБОРА

Как известно, интенсивная эксплуатация подземных вод может нарушать сложившееся экологическое равновесие и привести к существенным изменениям в природном и культурном растительном покрове, животном мире и жизнедеятельности людей. Подобные экологические последствия исследованы пока еще слабо, так как такие исследования находятся на грани различных смежных наук, каждая из которых какое-то время считала их не своей областью. Тем не менее за последние годы появились работы, которые показали важность изучения взаимосвязи гидрогеологических условий и экологической обстановки, а также показали, что эти изменения могут быть как отрицательными, так и положительными по своим последствиям. Например, установлено, что величины водопотребления, солеустойчивости, глубины развития корневой системы различных растений, их урожайность в значительной мере зависят от глубин залегания подземных вод. Так, по данным Д.М. Каца [20], оптимальные глубины залегания грунтовых вод для хлопчатника в среднем за вегетацию составляют 1,2—1,5 м, для картофеля и кукурузы — 1,5—2 м, овощей — 0,7—1,5 м, кормовых трав — 0,7—0,8 м, садов — 2—3 м и т. д. Понижение или повышение уровней грунтовых вод относительно указанных оптимальных глубин приводит к снижению урожайности в два-три раза и более, так как подъем уровней приводит к подтоплению корневой системы и ее частичному отмиранию из-за недостатка кислорода, а понижение — к иссушению почв. Естественно, оптимальные для каждого вида культур глубины залегания, определяющие урожайность сельскохозяйственных культур, устанавливаются в соответствии с литологическим строением зоны аэрации (высотой капиллярного поднятия), климатической зоной и степенью засоленности подземных вод. Немаловажным оказывается и внутригодовой режим уровней грунтовых вод. Так, высокий уровень грунтовых вод благоприятно сказывается на росте озимой пшеницы и ряда других культур лишь в начале вегетационного периода, а в дальнейшем оказывается для них губительным. Снижение уровней грунтовых вод в процессе их эксплуатации или под влиянием перетекания в нижележащий эксплуатационный напорный горизонт может привести к переосушению зоны аэрации и снижению урожайности сельскохозяйственных культур. В случаях, когда эксплуатация подземных вод приводит к дренированию переувлажненных земель, что особенно часто встречается в долинах рек при работе инфильтрационных водозаборов, может, наоборот, значительно повыситься урожайность трав на заливных лугах. Так, урожайность луговых трав на подтопляемых землях Присухонской низины составляет всего 1,5—3 ц с 1 га, а на хорошо дренированных участках — до 20—22 ц с 1 га. При этом в первом случае произрастают жесткие корма осокового типа, а во втором — сочные, высококачественные.

При эксплуатации подземных вод в долинах рек аридной зоны неоднократно отмечалась гибель влаголюбивой растительности. Так, по данным М.А. Хордикайнена [5], под влиянием эксплуатации подземных вод в долине р. Каракенгир (Центральный Казахстан) довольно быстро отмерли гидрофиты – ива, тростник, рогоз; частично отмерли или были угнетены фреатофиты: полынь, жимолость татарская, шиповник; высохли тугайные заросли. При эксплуатации линз пресных подземных вод в пустынных районах также исчезают влаголюбивые растения – чиевник и др. Аналогично влияние изменений уровней подземных вод на продуктивность лесов. В гумидной зоне дренирование территорий повышает бонитет леса, а в аридной – может привести к гибели лесов. Так, в районе одного из водозаборов на Самур-Кусарчайском междуречье для сохранения лесов пришлось рассмотреть вопрос о снижении размеров водоотбора и запланировать использование части водоотбора для орошения леса. Последняя мера вызвана еще и стремлением поддержать существующую увлажненность лесной подстилки для предотвращения размножения саранчи. В северных районах снижение в результате дренирования подземных вод степени увлажненности лиственных лесов и кустарника приводит к улучшению условий для размножения энцефалитных клещей и возрастанию соответствующих заболеваний. Одновременно повышение степени дренированности территорий приводит к сокращению заболеваний малярией, а также к частичному отмиранию ряда видов грызунов, переносящих через воду лихорадочные заболевания (туляремия, лептоспироз). Вызванные водоотбором "тепловые загрязнения" подземных вод, по мнению ряда специалистов, усиливают их токсические эффекты даже в тех случаях, когда имеющиеся в водах токсичные компоненты содержатся в количествах несколько ниже ПДК.

Таким образом, интенсификация водоотбора может изменить и медико-биологическую обстановку в районе, которую необходимо предвидеть с тем, чтобы своевременно предусмотреть соответствующие профилактические меры в случаях, когда она будет складываться неблагоприятно для человека.

ВЛИЯНИЕ КРУПНЫХ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА РЕСУРСЫ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Эксплуатация или планирование использования подземных вод не могут осуществляться без учета проводимых или планируемых в районе крупных водохозяйственных мероприятий, таких как создание водохранилищ, территориальные перераспределения стока, отбор поверхностных вод на орошение и т. п. Такие мероприятия могут существенно отразиться не только на количестве, но и на качестве подземных вод. Создание водохранилищ, в том числе для целей переброски стока, обычно улучшает условия восполнения запасов подземных вод, приводит к увеличению мощностей водоносных горизонтов и приуроченных к ним эксплуатационных запасов подземных вод. В ряде случаев вдоль трасс переброски произойдет опреснение водоносных горизонтов и увеличение запасов подзем-

ных вод за счет фильтрационных потерь из каналов, оросителей и водохранилищ. Ухудшение условий водоснабжения следует ожидать лишь в нижнем бьефе ниже зоны отъема стока. Помимо несущественного снижения уровней подземных вод, здесь возможно некоторое увеличение разгрузки солоноватых вод в русло рек и за счет этого подсос этих вод к водозаборам, а также возможно ухудшение качества эксплуатируемых подземных вод в устьевых частях рек, где в результате снижения расходов речного стока возрастет глубина проникновения морских вод (галоклина) по долине в итоге нагонных явлений.

В зонах водохранилищ в период из заполнения, которое будет осуществляться несколько лет, возможно ухудшение качества подземных вод за счет фильтрации в них загрязненных поверхностных вод. Здесь также происходит отжатие куполов соленых вод из-под русел рек в сторону их бортов, что может привести к подсосу солоноватых вод к расположенным вблизи водохранилищ эксплуатационным скважинам. Кроме того, создание водохранилищ нередко приводит к затапливанию перспективных месторождений подземных вод, приуроченных к аллювиальным отложениям, что ухудшает перспективы организации водоснабжения за счет подземных вод. Имелись случаи, когда разведочные работы под водозабор проводились в зоне планируемого затопления. В зонах распределения предполагаемой переброски части стока северных рек следует ожидать лишь улучшение условий водоснабжения, формирование новых искусственных запасов подземных вод как вдоль реки, так и на массивах орошения.

Снижение уровней грунтовых вод в зоне отъема стока или повышение их уровней в районах водохранилищ, каналов и на орошаемых территориях приводит к изменению не только водного, но и солевого баланса подземных вод. Поэтому, прогнозируя изменения глубин залегания подземных вод под влиянием крупных водохозяйственных мероприятий, можно, исследовав соответствующие закономерности, определить возможную изменчивость инфильтрационного питания, испарения, особенностей химического состава подземных вод и даже оценить возможную изменчивость внутригодового гидродинамического, гидрохимического и гидрогеотермического режимов подземных вод. Таким образом, эти изменения могут повлиять и на условия восполнения запасов подземных вод и на их качество, что требует оценки и учета при планировании использования подземных вод в зонах влияния крупных водохозяйственных мероприятий.

НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ВИДЫ ВЛИЯНИЯ ОТБОРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Влияние эксплуатации подземных вод на окружающую среду во многих аспектах еще не изучено, дискуссионно и требует внимательного анализа, количественных оценок и определения путей прогнозирования. Одним из таких вопросов является влияние водоотбора на активизацию сейсмической деятельности в сейсмически активных районах. О возможной связи данного явления с гидродинамической обстановкой в земной коре гово-

рят некоторые статистические данные. Например, Е.С. Штенгелов [41] отмечает обратную связь между уровнями верхнеюрского водоносного горизонта и сейсмичностью Крыма, которая возрастает в периоды интенсивного питания подземных вод, т. е. при высоких положениях уровней (декабрь—май) и резко падает в период межени (июль—октябрь). Большинство сильных землетрясений в Крыму совпадают с резкими снижениями уровней подземных вод. Известны и другие случаи, когда изменения в режиме уровней подземных вод (их подъем или спад) перед землетрясениями (на Курильских островах, в Средней Азии) определялись, наоборот, изменением напряженного состояния земной коры, вызванного тектоническими движениями, и служили одним из предвестников землетрясения. Водоотбор в такие периоды, по-видимому, может приблизить начало землетрясения. Эффекты влияния водоотбора на сейсмичность могут быть различными. В зонах, где землетрясения связываются со сбросами, растяжением земной коры, приводящей к снижению уровней подземных вод перед землетрясением, водоотбор может ускорить момент землетрясения. Там, где землетрясения вызываются надвиговыми движениями, приводящими к сжатию прилегающей части земной коры и подъему уровней подземных вод перед землетрясением, водоотбор будет способствовать снятию давления и замедлению момента землетрясения. Все эти вопросы требуют еще своего изучения, научного обоснования и возможно в будущем смогут учитываться при размещении водозаборов и для управления сейсмической активностью.

Слабоизученным пока является и влияние эксплуатации подземных вод на многолетнемерзлые породы. Это определяется еще не достаточно интенсивным использованием подземных вод в данной зоне крупными водозаборами. Однако в районах существующих водозаборов, эксплуатирующих подземные воды в зоне развития многолетней мерзлоты, отмечается уменьшение или полное исчезновение наледного стока в зимний период, размораживание грунтов в бортах долины, рост таликовых зон. Поэтому изучение и прогноз всех этих явлений представляет практический интерес, и для этой цели необходимо ставить соответствующие режимные наблюдения и проводить теоретические исследования.

Известно влияние водоотбора подземных вод на мелиоративную обстановку прилегающих территорий. Отмечалось, что интенсивный водоотбор создает благоприятные условия для искусственной дренированности территорий. Как известно, большинство городов испытывает подтопление за счет грунтовых вод. Неуклонный подъем их уровней происходит под влиянием серии факторов, среди которых следует отметить утечки из канализационных и водопроводных сетей, поливы улиц и зеленых насаждений, конденсацию влаги под зданиями и сооружениями. Темпы подъема уровней грунтовых вод нередко достигают десятков сантиметров в год, что в итоге приводит к затоплению подвалов, выщелачиванию и разрушению цемента агрессивными грунтовыми водами, выходу из строя различных коммуникаций, разрушению зданий. Водоотбор в таких районах снижает темпы развития подтопления, улучшает мелиоративную обстановку. В случаях же, когда водоотбор подземных вод может сократиться при подклю-

чении другого источника водоснабжения, необходимо предвидеть возможное увеличение подтопления территорий городов и принять своевременно соответствующие меры. Оценка и прогноз влияния водоотбора на уровни грунтовых вод в таких условиях возможны лишь на основе моделирования, которое позволит уточнить параметры разделяющих слоев, учесть сложность различных хозяйственных воздействий на подземные воды на урбанизированной территории, характер изменчивости водоотбора во времени и пространстве, его рассредоточенность по площади с многочисленными локальными воронками депрессии, влияние дренажных систем города и т. д. Аналогична роль водоотбора на орошаемых землях, где он улучшает условия дренированности территорий и снижает опасность вторичного засоления земель.

Слабо изучено влияние водоотбора подземных вод в прибрежных областях на границу раздела пресных и соленых вод, на качество речных вод и рыбное хозяйство (естественно, когда водоотбор соизмерим с поверхностным стоком, снижение которого приводит к возрастанию концентраций загрязнений и изменений планктона в нем), на медико-биологическую обстановку окружающей среды и т. д. Эти проблемы возникают все чаще в гидрогеологии, и специалисты, изучающие режим подземных вод, обязаны находить контакты со специалистами соответствующего профиля для совместного их решения. Результатом таких исследований должны стать не только прогнозы возможных экологических последствий эксплуатации подземных вод, но и выработка защитных водоохранных мероприятий, которые позволили бы полностью исключить негативные последствия или значительно снизить отрицательные эффекты.

Глава 7

ВОПРОСЫ ОХРАНЫ И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Одной из основных задач гидрогеологических служб страны является контроль за состоянием и использованием подземных вод в связи с их охраной от истощения, загрязнения, возможного влияния на окружающую среду, а также в связи с обоснованием рациональных форм эксплуатации подземных вод. Всем этим вопросам посвящено много работ как в СССР, так и за рубежом [2, 10, 11 и др.]. Подходы к решению этих вопросов и вкладываемые в них представления в разных странах и у различных авторов нередко различны и поэтому здесь прежде всего следует определить такие понятия, как оптимальное и рациональное использование подземных вод, истощение и загрязнение подземных вод.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Под оптимальным использованием подземных вод целесообразно понимать водоотбор, не превышающий приходных статей водоносного горизонта как сформировавшихся в естественных условиях (например, при

каптаже родников), так и трансформированных под влиянием эксплуатации (с учетом привлекаемых ресурсов, формирующихся за счет снятия испарения, подсоса речных вод, перехвата водоразделов, отжатия воды из разделяющих слабопроницаемых отложений и др.). Такой водоотбор может существовать неограниченно долго и не приведет ни к истощению подземных вод, ни к каким-либо существенным нарушениям в природной обстановке, что и определяет оптимальность использования подземных вод. Под истощением подземных вод в данном случае понимается вызванная превышением водоотбора над восполнением постоянная во времени сработка емкостных запасов подземных вод. В безнапорных условиях истощение запасов подземных вод выражается постоянным во времени снижением уровней и осушением водоносного горизонта, а в напорных: на первом этапе — в постоянном снижении напоров (сработкой упругих запасов), а на втором — в постоянном осушении пласта.

Однако далеко не всегда эксплуатация подземных вод может быть организована в рамках оптимальных форм, а в ряде случаев, например в неограниченных пластах, она вообще невозможна. Здесь истощение запасов подземных вод становится неизбежным и даже рациональным, тем более, что за счет сработки емкостных и даже только упругих запасов (а тем более в сумме с постоянным восполнением запасов подземных вод), как показывает опыт, может быть организовано водоснабжение довольно крупных городов и на продолжительные сроки (на десятилетия). В этих случаях период возможной полной сработки запасов подземных вод должен строго рассчитываться с тем, чтобы по его истечении заблаговременно можно было бы организовать водоснабжение на иной основе.

Таким образом, истощение запасов подземных вод может планироваться, а поэтому рациональным освоением запасов подземных вод можно считать их использование в рамках обоснованных величин их эксплуатационных запасов в пределах установленного срока эксплуатации. Нерациональным в этом случае становится водоотбор, превышающий рассчитанные эксплуатационные запасы подземных вод, гарантировавшие водоснабжение на определенный расчетный срок. Другими словами, в наиболее общем случае истощение запасов подземных вод начинается тогда, когда водоотбор из них превышает эксплуатационные запасы. Под эксплуатационными запасами понимается такое количество подземных вод, которое может быть получено рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям в течение всего расчетного срока водопотребления.

Из этого определения видно, что понятие эксплуатационные запасы, а следовательно, и истощение подземных вод несколько условно. Так, при усовершенствовании насосного оборудования, позволяющего поднять воду с больших глубин, эксплуатационные запасы при том же количестве эсплуатационных скважин и том же их расположении могут быть увеличены, так как за этот срок можно получить большее количество воды. Поэтому со временем представления об истощении запасов подземных вод в каком-то районе могут меняться. Однако в любом случае каждая

гидрогеологическая или специальная гидрорежимная партия должна иметь четкие представления о имеющихся на территории их деятельности эксплуатационных запасов подземных вод и о размерах существующего и перспективного водопотребления.

Для перспективных оценок возможного использования подземных вод и определения планов рационального использования и охраны подземных вод в будущем необходимо также иметь представления об имеющихся прогнозных потенциальных и перспективных эксплуатационных ресурсах подземных вод. Как известно [37], потенциальные эксплуатационные ресурсы отражают потенциальный предел возможного использования подземных вод, расположенными по сетке водозаборами при установленной допустимой сработке естественных емкостных и упругих запасов подземных вод (на конец расчетного срока).

Перспективные эксплуатационные ресурсы отражают предельно возможный водоотбор при реальной схеме размещения водозаборов и при снижении уровней до предельно допустимых глубин на конец расчетного срока.

Под загрязнением, как уже отмечалось выше, понимается направленное, вызванное антропогенными факторами изменение качества подземных вод, независимо от того, достигло оно ПДК или нет. Такой подход к понятию загрязнения подземных вод обязывает изучать и вскрывать появляющееся загрязнение уже на начальных стадиях его развития. При наличии режимных наблюдений такое загрязнение идентифицируется по направленным трендам в качественных показателях подземных вод во времени. При отсутствии же регулярных наблюдений выявление начальных стадий загрязнения подземных вод может быть осуществлено лишь на основе изучения региональных закономерностей формирования химического состава подземных вод. В частности, выявление произошедших изменений качества подземных вод осуществляется на основе вероятностно-статистического анализа данных массового гидрохимического опробования по основным водоносным горизонтам изучаемого региона. По данным такого гидрохимического опробования строятся гистограммы распределения частот по отдельным компонентам состава подземных вод. По ним оценивается диапазон возможных и наиболее вероятных вариаций фоновых характеристик для каждого компонента, учитываются корреляционные связи фоновых характеристик к особенностями химического состава подземных вод и гидрогеологических условий [48], по отклонениям от которых можно установить начальные стадии загрязнения подземных вод даже при отсутствии специальных режимных наблюдений. Проведение же наблюдений позволяет уже не только доказать развитие загрязнений по проявившимся трендам, но спрогнозировать изменения концентраций того или иного компонента химического состава подземных вод во времени. Особенно важно вскрыть начавшееся загрязнение подземных вод в горизонтах, используемых для питьевого водоснабжения и прежде всего в зонах сосредоточенного водоотбора.

ИНФОРМАЦИЯ И КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рациональное и оптимальное использование подземных вод может быть организовано лишь при соответствующей системе наблюдений за режимом подземных вод и их эксплуатацией, а также при организованной информации заинтересованных организаций о состоянии подземных вод. Такая информация должна отражать как представления о существующих в районе подземных водах, их количестве, качестве, условиях водоотбора и произошедших под его влиянием изменений в подземных водах и окружающей среде, так и служить основой прогнозов возможных изменений в подземных водах при планируемом водоотборе с учетом планируемых водохозяйственных мероприятий, развития загрязнений и т. д.

Представления о существующих подземных водах обычно отражаются сериями гидрогеологических карт распространения подземных вод, естественных ресурсов, эксплуатационных запасов подземных вод, гидрохимических карт и др. Сопоставление размеров возможного и существующего водоотбора по диаграммам или таблицам, составленным для каждого гидрогеологического района, наглядно показывает, на каких участках имеются перспективы для увеличения водоотбора и на каких он близок к предельно допустимому. Такие карты, диаграммы и таблицы служат основой для обоснования мероприятий по охране подземных вод от истощения, а также для планирования дальнейшего освоения подземных вод. Все эти данные должны систематически уточняться с учетом новых данных о подземных водах и условиях их эксплуатации.

Помимо сведений о естественных ресурсах и эксплуатационных запасах подземных вод, в функции гидрогеологических стационарных режимных партий входит оперативная информация эксплуатирующих и всех заинтересованных в изучении режима подземных вод организаций о полученных в результате наблюдений данных: а) о характере режима подземных вод за какой-то промежуток времени (квартал, полугодие, год), т. е. о темпе снижения уровня подземных вод и особенностях развития воронки депрессии, о размерах водоотбора и об угрозе истощения при превышении водоотбора над установленным пределом; б) о прогнозе режима подземных вод на полгода или год вперед как при существующем темпе водоотбора, так и при нескольких вариантах изменения размеров водоотбора, оцениваемых эмпирическим путем или по проектным разработкам; в) о прогнозе продвижения контура соленых или загрязненных вод, изменениях концентраций смешения подземных вод, об угрозе или начале процесса загрязнения.

Такие информации должны выпускаться периодически в виде бюллетеня. Частота выпуска бюллетеней должна зависить от их актуальности. Например, для водозаборов, эксплуатирующих напорные воды в начальной стадии эксплуатации, когда каких-либо реальных угроз истощения или загрязнения нет, информацию о режиме достаточно давать раз в год. Для водозаборов, где динамические уровни приближаются к предельно допустимым понижениям и возникает угроза подсоса соленых или загряз-

ненных вод, а также для водозаборов, эксплуатирующих грунтовые воды, режим которых тесно связан с метеорологическими и гидрологическими факторами и особенно для водозаборов, расположенных в условиях периодически пересыхающих водотоков, при каптаже родников и т. д., информация о режиме подземных вод и прогнозе должны даваться чаще — раз в полгода или раз в квартал.

Результаты наблюдений обобщаются в виде: а) карт режима уровней (фактических и прогнозных) и положений фронта некондиционных вод, карт нарушений в окружающей среде, вызванных эксплуатацией подземных вод; б) графиков режима уровней водоотбора и химического состава подземных вод (фактических и прогнозных); в) табличной информации о результатах гидрорежимных наблюдений и прогнозов режима с различной заблаговременностью как для целей оперативного управления водоотбором (полгода, год), так и для перспективного планирования эксплуатации (на несколько лет с вариантами прогнозов).

Помимо указанных сведений, в информациях по мере надобности должны даваться необходимые рекомендации:

а) о рациональной эксплуатации подземных вод, т. е. в какие периоды года и по каким эксплуатационным скважинам можно увеличить или сократить водоотбор при сохранении суммарного водоотбора в прежних размерах и без изменения схемы водозабора, для которой утверждены запасы;

б) о необходимости рассредоточения водоотбора по площади и сокращения размеров водоотбора в центре воронки депрессии. Резкое снижение уровней в центре воронки депрессии можно предотвратить путем запрещения бурения новых эксплуатационным скважин и ограничения размера водоотбора по существующим скважинам в центре воронки депрессии (на ряде водозаборов такие меры приводили даже к подъему уровней в центре воронки, например при эксплуатации Михайловской мульды в Казахстане);

в) о возможном увеличении водоотбора;

г) о необходимости и путях искусственного восполнения запасов подземных вод;

д) об изменениях зон санитарной охраны и т. д.

Выдача такого рода рекомендаций и контроль за их выполнением поможет регулировать режим подземных вод в районах водозаборов и тем самым более полно и рационально использовать запасы подземных вод. Для того чтобы возможно было учитывать все изменения в условиях эксплуатации и соответственно оперативно регулировать режим эксплуатации, необходимо постоянно составлять дежурные карты срезок или понижений уровней. Особенно важно составлять такие карты в районах интенсивной площадной эксплуатации, где почти все водозаборы взаимодействуют между собой. Ежегодно в стране для целей водоснабжения бурится от 30 до 40 тысяч скважин. В связи с этим важна современная организация наблюдений как за режимом водоотбора наиболее крупных водопотребителей (групповых водозаборов), так и за режимом уровней подземных

вод в пределах зоны их эксплуатации. Эта задача входит в обязанности эксплуатирующих организаций, которые должны проводить наблюдения за режимом уровней, химическим составом и водоотбором подземных вод.

ФОРМЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Руководствуясь принципом единства природных вод, нетрудно представить, что любые нарушения в одной из гидравлически взаимосвязанных ее частей неизбежно скажутся и на других. В связи с этим необходимым и важным становится создание комплексных моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод, позволяющих оценить всевозможные изменения, которые могут произойти в подземных водах при любых нарушениях в поверхностном стоке, и наоборот. Такого рода модели уже рассматривались рядом исследователей [12, 14, 43, 44 и др.], но требуют дальнейшего развития для различных природных и водохозяйственных условий. Они позволяют создать единую гидродинамическую модель как для отдельных частей какого-то водосборного бассейна, так и для бассейнов в целом. Особенно важно создание таких моделей в бассейнах, где объемы поверхностного и подземного стока соизмеримы, а также в речных бассейнах с напряженным водным балансом, когда изменение водоотбора подземных вод в районе одного населенного пункта может существенно сказаться на условиях водообеспечения населенных пунктов, расположенных ниже по течению, особенно, если все водозаборы в бассейне имеют достаточно тесную связь с рекой.

В связи с дефицитом качественных пресных вод стоит задача усовершенствования и более широкого введения в практику различных форм комплексного использования поверхностных и подземных вод. В настоящее время в практике водного хозяйства СССР и за рубежом уже частично рассматриваются и опробируются следующие формы комплексного освоения ресурсов поверхностных и подземных вод.

1. Подземные воды как наиболее качественная и дефицитная часть ресурсов пресных вод в соответствии с водным законодательством страны должны использоваться только для питьевых целей, а поверхностные воды — для технического водоснабжения и орошения. Однако эта форма развита еще в крайне ограниченных масштабах, особенно в городах, где создание двух водопроводов (с питьевой и технической водой) связано с значительными капитальными вложениями.

2. Интенсивная эксплуатация подземных вод водозаборами инфильтрационного типа в водоносных горизонтах, гидравлически тесно связанных с реками. Такие условия эксплуатации способствуют магазинированию поверхностного стока и более полному освоению водных ресурсов бассейнов. Сработка емкостей водоносных горизонтов (аллювия и подстилающих его водовмещающих слоев) осуществляется в межпаводковые периоды, а естественное восполнение сработанных запасов — в паводки. Подобное сезонное подземное регулирование поверхностного стока срезает не-

продуктивно проходящие паводки, снижает расходы поверхностных вод на испарение (по сравнению с альтернативным решением проблемы регулирования поверхностного стока за счет создания водохранилищ), улучшает качество поверхностных вод, используемых таким путем для водоснабжения, может быть применено практически повсеместно и дешевле по сравнению со строительством плотин. Особенно эффективна данная форма регулирования поверхностного стока в долинах рек с периодически пересыхающим и ограниченным по размерам речным стоком. Возможные размеры водоотбора оцениваются в зависимости от величин емкостных характеристик водоносных горизонтов, расходов и продолжительности поверхностного стока, продолжительности маловодного периода и условий восполняемости сработанных запасов подземных вод [19 и др.].

3. Подземные воды используются лишь в качестве резерва для покрытия дефицита в воде в отдельные маловодные периоды. В этих случаях основным источником водоснабжения, требующего больших объемов воды (например, для орошения или водоснабжения городов-гигантов), являются поверхностные воды. Ресурсы подземных вод рассматриваются как дополнительный источник, подключаемый в самые дефицитные моменты времени на короткие промежутки ежегодно или в отдельные маловодные годы. Такая кратковременная эксплуатация подземных вод даже при ограниченности их ресурсов позволяет форсированно отобрать значительные количества воды. Восполнение сработанных запасов осуществляется в течение последующих многоводных периодов естественным или искусственным путем за счет поверхностных или подземных вод. Аналогичным образом подземные воды используются в ряде стран (Великобритании, Франции, Испании) для пополнения поверхностного стока в отдельные маловодные периоды года. Необходимость таких мер определяется соизмеримостью используемого для водоснабжения поверхностного стока с величинами водопотребления в маловодные периоды. Это имеет место довольно часто в густонаселенных районах, когда в долинах сравнительно небольших рек располагаются несколько крупных городов и речной сток почти полностью разбирается в маловодные периоды.

Водозаборы инфильтрационного типа закладываются в этих случаях выше по течению реки от основных потребителей в пределах водоносных горизонтов, обладающих значительной емкостью (с большими геологическими запасами). Расстояние водозаборов от реки выбирается таким образом, чтобы в процессе их кратковременной работы (от нескольких дней до двух-трех месяцев каждый год или только в засушливые годы) ущерб речному стоку оказался минимальным.

Откачиваемые подземные воды сбрасываются в реку, увеличивая тем самым поверхностный сток и улучшая его санитарное состояние. В последующий многоводный период года осуществляется естественное восполнение сработанных запасов подземных вод за счет поверхностного стока и естественного питания подземных вод. Русло реки в результате служит естественным водопроводом между такого типа водозабором и потребителями.

Увеличенный таким путем поверхностный сток распределяется между потребителями непосредственно поверхностными водозаборами или перехватывается инфильтрационными водозаборами. В последнем случае в периоды маловодья рассматриваются возможности полной сработки емкостей водоносных горизонтов с последующим их естественным или искусственным (с использованием нагнетательных колодцев) восполнением в многоводный период. Таким образом, поверхностные и подземные воды рассматриваются как единая водоносная система, пополнение которой в различные периоды времени регулируются по необходимости. В настоящее время имеется довольно обширный опыт исследований в этой области, направленных на различные аспекты использования подземных вод и, в частности, на обоснование оптимального выбора мест водозаборов от реки как с точки зрения получения максимального водоотбора при минимальном ущербе поверхностному стоку, так и с точки зрения снижения затрат на подобную эксплуатацию подземных вод при наибольшей их экономичности; на изучение возможных потерь речного стока за счет сокращения естественной разгрузки подземных вод и перехвата стока в зоне эксплуатации, на возможные экологические изменения в русле реки за счет смешения вод различного состава и т. д. [44].

Объемы существующего восполнения поверхностного стока на каждом участке пока невелики (до 0,5 $м^3/с$). Отмечается дешевизна подобного пути решения проблемы водоснабжения, его повсеместная доступность, легкая возможность поэтапного наращивания водоотбора и рассредоточение по площади водосбора, быстрота ввода в действие, отсутствие негативных последствий для окружающей среды, оздоровление рек, эффективное и полное использование водных ресурсов каждого бассейна и возможность регулирования их использования во времени и в зависимости от изменений условий восполнения поверхностных и подземных вод. Поэтому уже в ближайшее время планируется увеличение восполнений рек в более широких масштабах, например до 4 $м^3/с$ в бассейне р. Темзы [45]. Все это свидетельствует об оправданности совместного использования поверхностных и подземных вод, создания комплексных моделей взаимодействия поверхностных и подземных вод, позволяющих определить оптимальные объемы форсированного отъема подземных вод для покрытия дефицитов в воде в маловодные годы или сезоны года, включая перераспределение ресурсов подземных вод из смежных водосборных бассейнов.

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Оптимизация использования подземных вод включает разработку различных приемов управления режимом подземных вод, обоснование рациональных форм эксплуатации подземных вод, распределение нагрузок на различные скважины, обоснование оптимальных конструкций водозаборов, позволяющих более полно использовать имеющееся восполнение за-

пасов, сокращение площадей водозаборов и отводимых под них земель, обоснование рационального режима водоотбора по сезонам года, комбинирование эксплуатации подземных вод с их искусственным пополнением, а также управление режимом водоотбора с учетом снижения негативного влияния различных объемов водоотбора на окружающую среду. Как уже отмечалось выше, интенсивная эксплуатация подземных вод оказывает как положительные, так и отрицательные воздействия на ландшафтные условия. В связи с этим разработка путей оптимизации использования подземных вод и управления их режимом должна базироваться, в качестве одного из элементов, на прогнозировании и минимизации отрицательных эффектов водоотбора на окружающий ландшафт.

Одной из основных форм управления режимом и ресурсами подземных вод и способом борьбы с истощением их запасов служит искусственное восполнение или маганизирование подземных вод, которое имеет многоцелевое назначение. Помимо увеличения запасов подземных вод для поддержания заданной производительности водозаборов, или ее увеличения, восполнение проводится в целях улучшения качества подземных вод, для защиты эксплуатируемых горизонтов от подтока некондиционных вод, регулирования поверхностного стока и его непродуктивного расходования на испарение и сохранение необходимой экологической обстановки. Источником восполнения обычно служат поверхностные воды. Наиболее часто восполнение осуществляется в виде свободной фильтрации поверхностных вод через специально созданные инфильтрационные бассейны, инфильтрационные траншеи, из обводных каналов, а также в виде лиманного затопления территорий, реже — в виде принудительного нагнетания в скважины. Схемы сооружений для искусственного восполнения, условия подготовки воды и требования к ней, особенности гидрогеологических исследований и методы оценки запасов подземных вод при искусственном восполнении рассмотрены в ряде специальных работ [33, 34 и др.].

В задачи изучения режима подземных вод на участках искусственного восполнения запасов подземных вод входят:

1. Оценка изменчивости эффективности искусственного восполнения во времени и обоснование мер по ее повышению. Эффективность оценивается по коэффициентам полезного действия $\alpha_п$ и общей эффективности $\alpha_э$ восполнения. Коэффициент $\alpha_п$ представляет собой отношение расхода воды, дополнительно поступающей к водозабору, к расходу воды, забираемой на восполнение, а коэффициент $\alpha_э$ характеризует долю искусственно формируемой производительности в общей производительности водозабора.

2. Изучение процессов кольматации фильтрующего слоя, скоростей формирования илистого слоя и биологической пленки на дне бассейна и их влияния на фильтрационную способность бассейнов, обоснование периодичности чистки таких бассейнов; изучение скоростей зарастания фильтров нагнетательных скважин под влиянием физико-химических и биологических процессов и обоснование периодичности ремонта скважин.

3. Прогноз качества отбираемых водозабором подземных вод в условиях их искусственного восполнения и систематический контроль за эф-

фективностью очистки и самоочищения используемой для восполнения воды.

4. Определение обобщенных гидрогеологических параметров в условиях искусственного восполнения (с учетом вновь созданных границ пласта) и переоценка запасов подземных вод с учетом их искусственного восполнения. Выявление возможных изменений граничных условий во времени и прежде всего степени гидравлической связи поверхностных и подземных вод — отрыва уровней подземных вод от инфильтрационного бассейна при его заилении и смене подпертого режима фильтрации дождеванием.

5. Обоснование оптимальных режимов эксплуатации подземных вод на водозаборе с учетом естественного и нарушенного гидродинамического и гидрохимического режимов поверхностных и подземных вод на участке водозабора, уточнение природоохранных мер в пределах зон санитарной охраны водозабора. Некоторые возможные способы решения указанных задач рассмотрены выше, а также в серии специальных работ, посвященных данной проблеме.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ И РАЦИОНАЛЬНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Рациональное использование подземных вод должно предусматривать и систему определенных охранных мер.

1. Изучение режима и ресурсов подземных вод как систему контроля за состоянием запасов подземных вод и основу обоснования мер их охраны. Помимо изучения региональных закономерностей естественного режима подземных вод для определения того фона, на котором развивается нарушенный режим, наблюдения за режимом подземных вод в процессе их эксплуатации служат также основой контроля соответствия расчетных и фактических эксплуатационных запасов подземных вод, соответствия качества подземных вод во времени требованиям ГОСТов на питьевую воду, прогнозов режима подземных вод. Они являются также основой для выработки своевременных мероприятий по охране подземных вод от их истощения и загрязнения и оценки эффективности принятых мер (ограничения или рассредоточения водоотбора, искусственного восполнения определения оптимального режима водоотбора, учитывающего как режим восполнения запасов подземных вод, так и требования водопотребления).

В задачи созданных для производства таких стационарных наблюдений специальных служб должны входить наблюдения за возможными вышеотмеченными изменениями в окружающей среде и активизацией различных техногенных процессов, вызываемых водоотбором. Процессы воздействия водоотбора на элементы ландшафта и окружающей среды в целом сложны, мало изучены, часто далеки от круга вопросов обычной деятельности гидрогеологов и поэтому требуют особого внимания, детальных комплексных исследований с привлечением специалистов различных профилей, накопления данных соответствующих наблюдений, вскрытия закономерностей и количественных связей в отмеченных явлениях.

2. В число охранных мер входит научно обоснованная система управления эксплуатационным режимом и ресурсами подземных вод, которая должна базироваться на охарактеризованных выше комплексных постоянно действующих моделях отдельных водосборных бассейнов подземных вод с учетом взаимосвязи поверхностных и подземных вод, а также на системе сооружений, регулирующих как поверхностный сток, так и искусственное восполнение запасов подземных вод. Обладая такой системой, можно не только предсказать возможные изменения в режиме и ресурсах подземных вод, которые могут произойти при различных вариантах водоотбора и изменениях естественного питания поверхностных и подземных вод во времени, но и подобрать на модели оптимальную форму эксплуатации поверхностных и подземных вод в складывающихся условиях, а также определить меры по регулированию водных ресурсов, например по сокращению водоотбора, усилению искусственного восполнения запасов подземных вод и т. п. Таким образом, за изучением и прогнозом режима подземных вод неизбежно должно следовать управление режимом и ресурсами подземных вод.

При определении форм комплексного освоения водных ресурсов в целом и ресурсов подземных вод в частности необходимо упомянуть и такие формы рационального использования подземных вод, как комбинирование шахтного водоотлива и водоснабжения, дренажа подтопляемых или засоляемых земель с водоснабжением и использованием подземных вод на орошение, повторное использование дренажных оросительных и возвратных вод.

3. Рационализация использования подземных вод требует усовершенствования водного законодательства в стране в части более строгой регламентации использования подземных вод для непитьевых целей, более строгой организации системы контроля за использованием подземных вод, проведением комплексных наблюдений за режимом количества и качества подземных вод в районах их эксплуатации, позволяющих уточнять эксплуатационные запасы подземных вод по опыту эксплуатации. Необходимы широкие исследования по изучению негативных последствий, вызываемых эксплуатацией подземных вод, исключению нерационального использования подземных вод в виде сбрасываемых в реки шахтных вод, бесполезно самоизливающих скважин, не переведенных на крановый режим, и все это требует более строгого контроля и ответственности. Необходимо повысить ответственность за более строгое выполнение требований ГКЗ по условиям эксплуатации подземных вод и охранным мероприятиям. В частности, зоны санитарной охраны, определяемые в районе водозаборов, должны не только устанавливаться, но и строго соблюдаться. Необходимо решить вопросы создания гидрогеологических заповедников, в которых мог бы быть сохранен естественный режим подземных вод как эталон для будущих сопоставлений и оценок возможных искусственных нарушений в режиме подземных вод, что имеет большое научное и практическое значение как и все вопросы, связанные с охраной окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Биндеман Н.Н., Язвин Л.С.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., Надра, 1970.

2. *Бочевар Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е.* Защита подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1979.

3. *Бочевар Ф.М., Орадовская А.Е.* Гидрогеологические особенности защиты подземных вод и водозаборов от загрязнения. М., Недра, 1972.

4. *Боревский Б.В., Самсонов В.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., Недра, 1979.

5. *Боревский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С.* Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подзамных вод в трещинно-карстовых пластах. М., Недра, 1976.

6. *Боревский Б.В., Язвин Л.С.* Методические рекомендации по перспективной оценке эксплуатационных запасов подземных вод в слабоизученных районах (в основном по категории C_2). М., ВСЕГИНГЕО, 1971.

7. *Гавич И.К.* Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. М., Недра, 1980.

8. *Гидрогеология* СССР. Т.3. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. М., Недра, 1967.

9. *Гидродинамические* и физико-химические свойства горных пород / Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков. М., Недра, 1977.

10. *Гольдберг В.М.* Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах. М., Недра, 1976.

11. *Дробноход Н.И., Язвин Л.С., Боревский Б.В.* Оценка запасов подземных вод. Киев, Высшая школа, 1982.

12. *Епихов Г.П.* Об единой математической модели рачного стока. — Водные ресурсы, 1978, № 5, с. 69—78.

13. *Зекцер И.С., Плотников Н.И., Язвин Л.С.* О перспактивах использования подзамных вод. — Водные ресурсы, 1970, № 2, с. 75—82.

14. *Злотник В.А.* Методы расчета береговых водозаборов подземных вод с оценкой их влияния на водный режим водоемов и водотоков. Автореф. канд. дис. М., ВСЕГИНГЕО, 1979.

15. *Инструкция* по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод к месторождениям пресных вод. М., ВИЭМС, 1978.

16. *Использование* и охрана подземных вод. Основы гидрогеологии / Под ред. Н.А. Маринова и Е.В. Пиннекера. Т.5. Основы гидрогеологии. Новосибирск, Наука, 1983.

17. *Киселев П.А.* Изучение баланса подземных вод в слоистых толщах по режимным данным. М., Недра, 1975.

18. *Ковалевский В.С.* Многолетние колебания уровней подземных вод и подземного стока. М., Наука, 1976.

19. *Ковалевский В.С.* Многолетняя изменчивость ресурсов подземных вод. М., Наука, 1983.

20. *Ковалевский В.С.* Основы прогнозов естественного режима подземных вод. М., Стройиздат, 1974.

21. *Ковалевский В.С.* Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М., Недра, 1973.

22. *Коноплянцев А.А., Семенов С.М.* Изучение, прогноз и картирования режима подземных вод. М., Недра, 1979.

23. *Коноплянцев А.А., Семенов С.М.* Прогноз и картирование режима подземных вод. М., Недра, 1974.

24. *Коноплянцев А.А., Ярцева-Попова Е.Н.* Оседание поверхности земли в связи с понижением уровня подземных вод. М., ВИЭМС, 1983.

25. *Лехов А.В.* Моделирование карстового процесса. — Инженерная геология, 1981, № 1, с. 31—37.

26. *Методические* рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод/Составитель В.М. Гольдберг. М., ВСЕГИНГЕО, 1980.

27. *Методические* рекомендации по контролю за охраной подземных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1976.

28. *Минкин Е.Л.* Взаимосвязь подземных и поверхностных вод и ее значение при решении некоторых гидрогеологических водохозяйственных задач. М., Стройиздат, 1973.

29. *Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К.* Охрана подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1980.

30. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М., Недра, 1978.

31. *О возможностях* применения гелиевой и тритиевой съемок для изучения условий питания подземных вод/В.Л. Злобина, В.С. Ковалевский, И.К. Марковкина и др. Водные ресурсы, 1980, № 1, с. 116—170.

32. *Оценка* изменений гидрогеологических условий под влиянием производственной деятельности/Под ред. В.М. Фомина. М., Недра, 1978.

33. *Плотников Н.И., Плотников Н.А., Сычев К.И.* Гидрогеологические основы искусственного восполнения запасов подземных вод. М., Недра, 1978.

34. *Плотников Н.И., Плотников Н.А., Сычев К.И.* Оценка запасов подземных вод с искусственным их восполнением. М., Недра, 1976.

35. *Плотников Н.И.* Эксплуатационная разведка подземных вод. М., Недра, 1973.

36. *Прогноз* качества подземных вод в связи с их охраной от загрязнения/Ф.И. Тютюнове, И.Я. Пантелеев, Т.И. Пантелееве и др. М., Наука, 1978.

37. *Региональная* оценка ресурсов подземных вод. М., Наука, 1975.

38. *Самсонов Б.Г., Зильберштейн Б.М., Бурдакова О.Л.* Определение гидрогеологических параметров при эффективной неоднородности водоносных горизонтов. ОНТИ ВИЭМС. Экспресс-информация. 1972, № 4.

39. *Фролов Н.М.* Гидрогеотермия. М., Недра, 1976.

40. *Шестаков В.М.* Методика интерпретации опытно-фильтрационных наблюдений. Изд-во МГУ, 1982.

41. *Штенгелов Е.С.* О влиянии эксплуатации и верхнеюрского водоносного горизонта на сейсмичность Крыма. — Водные ресурсы, 1980, № 2, с. 57—65.

42. *Язвин Л.С.* Достоверность гидрогеологических прогнозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. М., ВСЕГИНГЕО, 1971.

43. *Freeze R.N.* Role of subsurface flow in generating surfece runoff. Water Resources Res., 1972, vol. 8, № 3, p. 609—623.

44. *Groundwater* studies. UNESCO, Paris, 1972.

45. *Memoires* of IAH, Birmingham congr., 1977, vol. XIII, p. 1.

46. *Methods* and instrumetation for the investigation of groundwater systems. 1983. Netherlands, Int. Symp. IAH, TNO.

47. *Memoires* of IAH, Vilnius congress, Papers, 1979, vol. XV, Part 1.

48. *Memoires* Prague congress IAH, vol. XVI, Part I, II, III, Proceedings, 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

С.

Введение 3

Глава 1. Цели и задачи изучения режима подземных вод в связи с их использованием для водоснебжения 7

Задачи анализа ражима подземных вод при региональных оценках прогнозных эксплуатационных запасов подземных вод 7

Задачи изучения режима подземных вод на поисково-разведочной стадии изысканий в районах водозаборов 9

Задачи изучения режима подземных вод на стадии их эксплуатации 10

Задачи изучения режима подземных вод в связи с контролем за охраной подземных вод от истощения и загрязнения 14

Главе 2. Особенности формирования эксплуатационных запасоа подземных вод и принципы размещения наблюдательной сети в различных природных условиях 15

Типизация наблюдательной сети и принципы выбора объекта наблюдений 15

Особенности размещения набпюдательной сети в различных природных условиях 18

Водозаборы в артезианских бассейнах платформенного типа 18

Водозаборы в бассейнах межгорных впадин, на предгорных шлейфах и конусах выноса 25

Водозаборы в речных допинах 28

Водозаборы в районах зандровых и флювиогляциальных равнин. . . . 36

Водозаборы в месторождениях песчаных массивов пустынь и полупустынь 38

Водозаборы в районах развития трещинно-карстовых вод ограниченных структур и локализованных водосборных бассейнов 39

Водозаборы в области разеития многолетнемерзлых пород 44

Особенности размещения наблюдательной сети на стадиях предварительной и детальной разведки 45

Размещение опорной региональной наблюдательной сети. 47

Глава 3. Особенности производства и первичной обработки результатов наблюдений за режимом подземных вод в связи с их эксплуатацией 50

Изучение гидродинамического режима подземных вод. 51

Изучение гидрогеотермического режима. 57

Изучение гидрогеохимического режима 64

Наблюдения за окружающей средой. 69

Наблюдения за техническим состоянием наблюдательной сети и водозаборных сооружений 71

Оборудование скважин и требования, предъявляемые к приборам для производства наблюдений 75

Мониторинг состояния подземных вод в связи с их эксплуатацией . . 77

Глава 4. Методы анализа режима подземных вод при поисково-разведочных работах и региональных оценках эксплуатационных запасов подземных вод 80

Учет колебаний уровней подземных вод для определения ресчетных мощностей и питания водоносного горизонта. 80

Способы наращивания коротких рядов наблюдений и определения по ним расчетных мощностей горизонтов и амплитуд колебаний уровней подземных вод 88

Оценка и учет многолетних трендов при выборе расчетных параметров и определении питания подземных вод 95

Изучение и учет внутригодовых особенностей режима подземных вод 100
Исследования и учет вероятных чередований маловодных и многоводных периодов 105
Оценка естественного питания (естественных ресурсов) подземных вод 117
Оценка гидрогеологических параметров по данным наблюдений за режимом подземных вод 125
Оценка гидравлического сопротивления русловых отложений по данным наблюдений за режимом подземных вод. 133
Прогноз изменения инфильтрационного питания подземных вод под влиянием их эксплуатации 135
Глава 5. Методы анализа режима подземных вод в зонах влияния водозаборов 138
Определение гидрогеологических параметров по опыту эксплуатации. 139
Уточнение граничных условий и источников формирования запасов подземных вод. 150
Изменение плановых границ пласта 155
Изучение изменчивости восполнения запасов подземных вод 156
Прогноз режима уровня и уточнение эксплуатационных запасов подземных вод 158
Исследования и прогноз качества подземных вод 163
Обобщение данных режимных наблюдений в районах водозаборов . . 168
Глава 6. Влияние эксплуатации подземных вод на гидрогеологическую обстановку и окружающую среду 173
Изменения взаимосвязи водоносных горизонтов, режима и баланса подземных вод. 173
Изменение взаимосвязи поверхностных и подземных вод 175
Просадки земной поверхности 176
Активизация карстово-суффозионных процессов 178
Экологические последствия водоотбора 182
Влияние крупных водохозяйственных мероприятий на ресурсы подземных вод 183
Некоторые другие виды влияния отбора подземных вод на окружающую среду 184
Глава 7. Вопросы охраны и рационального использования подземных вод. 186
Основные понятия 186
Информация и контроль за состоянием использования подземных вод 189
Формы комплексного использования поверхностных и подземных вод 191
Управление режимом подземных вод. 193
Мероприятия по охране и рациональному использованию подземных вод 195
Список литературы 197