Б.В.БОРЕВСКИЙ, Б.Г.САМСОНОВ, Л.С.ЯЗВИН

# Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек

Б. В. БОРЕВСКИЙ, Б. Г. САМСОНОВ, Л. С. ЯЗВИН

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1973

УДК 556.332.042

**Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.** Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М., «Недра», 1973, 304 с.

В книге дается методика обработки и интерпретация результатов опытных работ преимущественно на основе графоаналитического метода прослеживания изменения уровня во времени и по площади. Приводится характеристика режима подземных вод при откачках в различных гидрогеологических условиях, сущности гидрогеологических параметров и методов их определения, а также принципов интерпретации данных опытных работ в условиях неограниченного и ограниченного напорного зернистого горизонта методом Джейкоба. Рассматриваются особенности интерпретации результатов опытных работ с учетом специфики гидрогеологических условий опробуемого участка: зернистые безнапорные, напорные и безнапорные трещинные и трещинно-карстовые, слоистые водоносные горизонты; участки вблизи действующих границ различного характера, участки с хаотической неоднородностью. Даются рекомендации по методике постановки и проведения опытных работ и учету естественных колебаний уровня при обработке их результатов.

Таблиц 37, иллюстраций 79, список литературы 185 названий.

Б $\frac{0296-290}{043(01)-73}$ 30-73

© издательство „НЕДРА", 1973

# ВВЕДЕНИЕ

Опытно-фильтрационные работы являются одним из основных видов гидрогеологических исследований, проводимых при решении самых разнообразных народнохозяйственных задач. Особенно большое значение этот вид работ имеет при поисках и разведках подземных вод для водоснабжения и орошения, на которые в системе Министерства геологии СССР расходуется 50—60% общих ежегодных госбюджетных ассигнований по отрасли «Гидрогеология и инженерная геология».

В связи с этим усовершенствование методики проведения опытно-фильтрационных исследований и обработки их данных приобретает особую важность, особенно учитывая их первостепенное значение в общем комплексе поисково-разведочных работ на подземные воды.

Методике проведения опытных работ и обработке их результатов посвящена обширная литература. Однако в работах, появившихся до шестидесятых годов, не учитываются последние достижения динамики подземных вод и связанные с ними существенные изменения в методике опытных работ. В более поздних работах, где методика проведения и обработки данных опытных работ базируется на современной гидродинамической теории, практически излагается только технология обработки данных откачек применительно к некоторым идеализированным условиям без должного учета конкретных природных особенностей месторождений подземных вод. В то же время разнообразие гидрогеологических условий, в которых проводятся опытно-фильтрационные исследования, сложный характер формирования режима подземных вод при опытных откачках, когда одинаковые закономерности изменения расходов и уровней могут быть вызваны влиянием самых разнообразных факторов, — все это требует обязательного анализа и интерпретации данных опытных работ как для определения основных гидрогеологических параметров, так и для оценки граничных условий водоносных горизонтов. В настоящее время получено большое количество решений для определения гидрогеологических параметров. Однако, несмотря на их высокую теоретическую обоснованность, не все из имеющихся методов равнозначны в конкретных природных условиях.

Авторы поставили перед собой задачу изложить основы методики обработки данных опытных работ и их интерпретации с учетом специфических особенностей водоносных горизонтов в различных гидрогеологических условиях, а также дать рекомендации по методике

постановки и проведения опытных работ при поисках и разведке подземных вод для водоснабжения. При этом, в отличие от имеющихся литературных источников, большинство методов обработки и интерпретации данных опытных откачек и выпусков показано на материалах конкретных гидрогеологических исследований, выполненных при поисках и разведке подземных вод в различных природных условиях.

При составлении книги был использован большой фактический материал по опытно-фильтрационным исследованиям, проведенным на конкретных объектах разведки различными производственными организациями Министерства геологии СССР.

Настоящую книгу нельзя рассматривать как сводную работу, в которой приводится полная характеристика всех методов обработки и интерпретации данных опытно-фильтрационных исследований. Основная задача книги — изложение методики проведения опытно-фильтрационных исследований и обработка их результатов для водоснабжения. В книге изложены только те методы, которые, с точки зрения авторов, являются наиболее целесообразными в анализируемых природных условиях.

В работе не рассматриваются вопросы, связанные с техникой проведения опытных работ (конструкции скважин, оборудование их фильтрами, насосное оборудование, приборы для замеров дебитов и уровней и т. д.), достаточно освещенные в литературе. По этой же причине не излагаются методика построения кривых зависимостей дебита от понижения, учет сопротивления в стволе скважины и фильтра, а также другие факторы (температура, газовый фактор и проч.), которые особенно заметно проявляются в глубоких скважинах. Определение параметров по данным эксплуатации в работе не рассматривается.

Книга рассчитана на широкий круг инженеров-гидрогеологов, занимающихся поисками и разведкой подземных вод для водоснабжения. Она может быть также использована при обработке данных опытно-фильтрационных работ, проводимых при решении других задач (разработка месторождений полезных ископаемых, исследования для ирригации, гидротехническое строительство и т. д.), а также быть полезна студентам-гидрогеологам при прохождении курсов «Методика гидрогеологических исследований» и «Поиски и разведка подземных вод».

Работа авторов при составлении книги распределялась следующим образом: раздел 1 главы 2, главы 6, 7 и 11 написаны Б. В. Боревским (раздел 2 главы 6 при участии Б. Г. Самсонова); главы 3, 4, 5, разделы 2 и 3 главы 7, разделы 1, 3 и 4 главы 10 — Б. Г. Самсоновым, введение, главы 1 и 9 — Л. С. Язвиным, раздел 2 главы 2, раздел 1 главы 7, разделы 2 и 5 главы 10 и глава 12 — совместно Б. Г. Самсоновым и Л. С. Язвиным. Общая редакция работы выполнена Л. С. Язвиным.

Основные расчетные операции выполнены О. Л. Бурдаковой и Л. И. Кривошеевой, графика Л. И. Кривошеевой.

Глава 1

# ВИДЫ И НАЗНАЧЕНИЕ ОТКАЧЕК, ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ИХ ПРОВЕДЕНИИ В РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

## 1. ВИДЫ ОТКАЧЕК И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

В настоящее время все откачки, которые проводятся при поисках и разведке различных типов месторождений подземных вод, могут быть подразделены на следующие три вида: пробные, опытные и опытно-эксплуатационные. Различие в назначении этих трех видов откачек определяет и методику их проведения, что находит отражение главным образом в продолжительности опытных работ и конструкции опытного куста. В связи с этим для проведения опытных работ необходимо прежде всего четко установить задачи, для решения которых проектируются опытно-фильтрационные исследования.

Наиболее массовым видом откачек при поисках и разведке подземных вод являются пробные откачки, которыми опробуются практически все скважины, пробуренные в процессе гидрогеологических исследований (поисковые, разведочные, наблюдательные). Эти откачки (выпуски) производятся для предварительной оценки фильтрационных свойств водовмещающих пород и качества подземных вод для получения сравнительной характеристики различных участков и зон.

Основным видом гидрогеологических работ, проводящихся на стадиях предварительной и детальной разведки, являются опытные откачки.

Опытные откачки проводятся для решения следующих вопросов:

1) определение основных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов (коэффициентов фильтрации, водопроводимости, пьезо- и уровнепроводности, водоотдачи, перетекания, приведенного радиуса влияния, суммарного сопротивления русловых отложений);

2) изучение граничных условий водоносных горизонтов в плане и разрезе (взаимосвязи подземных и поверхностных вод, взаимодействия смежных водоносных горизонтов и т. д.);

3) установление зависимости между дебитом скважины и понижением уровня в ней;

4) определение величин срезок уровня в пределах участка расположения водозабора при совместной работе эксплуатационных скважин.

В зависимости от наличия или отсутствия наблюдательных скважин опытные откачки подразделяются на кустовые и одиночные. Одиночные, опытные откачки проводятся для установления зависимости дебита от понижения. В связи с этим, в отличие от пробных, одиночные опытные откачки проводятся с двумя-тремя ступенями дебита. Кустовые откачки — основной вид опытных работ, когда задачей откачек является определение гидрогеологических параметров, изучение граничных условий, опытное определение величин срезок уровня. Разновидность кустовых откачек — опытные групповые откачки, которые целесообразно проводить для изучения условий взаимосвязи водоносных горизонтов и определения основных гидрогеологических параметров в тех случаях, когда отбор воды из одиночной скважины не может обеспечить необходимой точности расчетов в связи с незначительными абсолютными величинами понижений уровня.

Опытно-эксплуатационные откачки из одной или нескольких скважин проводятся только на стадии детальной разведки в сложных гидрогеологических и гидрохимических условиях, которые не могут быть отображены в виде расчетной схемы.

Цель опытно-эксплуатационных откачек — установление закономерностей изменения уровней подземных вод или их качества при заданном водоотборе.

При проектировании опытно-эксплуатационных откачек в сложных гидрохимических условиях следует учитывать, что проведение их для установления опытным путем изменения качества воды целесообразно только при опасности подтягивания некондиционных вод в вертикальном разрезе или в случае расположения водозабора на близком (несколько десятков метров) расстоянии от контура распространения привлекаемых подземных вод некондиционного состава. При больших расстояниях время передвижения контура измеряется годами, и изменение качества не может быть оценено в процессе откачек.

В зависимости от стадии гидрогеологических исследований, гидрогеологических условий и применяемого метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод по данным откачек может решаться или одна из перечисленных задач, или сразу несколько.

В большинстве случаев опытно-фильтрационные работы проводятся в основном для определения гидрогеологических параметров, однако нередко откачки проводятся для решения других задач (например, при применении гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод). В связи с тем что конечной целью опытно-фильтрационных работ является получение необходимых данных для количественной оценки основных источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод, при назначении методики работ необходимо учитывать практическую возможность

установления тех или иных из этих источников в процессе проведения опытных откачек. Кроме того, при проектировании откачек, целью которых является определение гидрогеологических параметров, важно оценить влияние различных границ пласта (в плане и разрезе) и специфических особенностей строения водовмещающих пород на закономерности снижения уровня подземных вод. Это необходимо для учета влияния этих факторов при последующих расчетах параметров. Для анализа этих вопросов рассмотрим закономерности изменения уровней подземных вод во времени (закономерности режима подземных вод при откачках) в различных гидрогеологических условиях.

## 2. РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОТКАЧКАХ В РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Процесс развития депрессионной воронки во время откачки является достаточно сложным, так как формирование уровенной поверхности происходит под воздействием целого ряда факторов, из которых в первоначальный период важнейшими являются осушение пласта (в безнапорных горизонтах) или влияние упругого режима (в напорных горизонтах). При увеличении длительности откачки размеры депрессии становятся столь значительными, что в некоторых случаях на ее формирование начинают оказывать существенное влияние процессы перетекания из ниже- и вышележащих горизонтов, привлечение подземных вод, разгружающихся в естественных условиях, а также различные границы пласта в плане и разрезе. В ряде случаев на закономерные изменения уровня во времени, вызванные отбором подземных вод при откачках, накладываются естественные колебания уровня. Кроме того, характер изменения уровня может осложняться техническими факторами (например, колебаниями дебита в процессе откачки).

Таким образом, режим подземных вод при опытных откачках определяется тремя группами факторов:

1) гидрогеологическими условиями (строением водовмещающей толщи и условиями на границах пласта в плане и разрезе);

2) естественным режимом подземных вод;

3) техническими условиями проведения опыта.

Наибольшее влияние на режим подземных вод при опытных откачках оказывает первая группа факторов. Поэтому рассмотрим кратко закономерности режима в различных типовых гидрогеологических условиях, характеризующихся различными условиями на границах водоносного горизонта в плане и разрезе и строением водовмещающих пород.

По особенностям режима подземных вод, которые следует учитывать при анализе данных опытно-фильтрационных исследований и определении основных гидрогеологических параметров, целесообразно следующим образом типизировать гидрогеологические условия.

1. Неограниченные водоносные горизонты, однородные по проницаемости и изолированные в кровле и подошве:

а) напорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях;

б) безнапорные водоносные горизонты в рыхлых отложениях;

в) напорные и безнапорные водоносные горизонты в трещиноватых породах.

2. Водоносные горизонты в слоистых толщах:

а) двухслойное строение водоносной толщи;

б) многослойное строение водоносной толщи.

3. Ограниченные водоносные горизонты:

а) водоносные горизонты, связанные с поверхностными водотоками и водоемами;

б) водоносные горизонты, ограниченные непроницаемыми контурами;

в) водоносные горизонты, состоящие из отдельных зон с различными водопроводимостью и (или) водоотдачей;

г) участки водоносных горизонтов с локальными очагами питания и разгрузки.

Коротко проанализируем закономерности изменения уровня в выделенных типовых условиях при откачках, проводящихся с постоянным дебитом. Более подробный анализ каждого типа будет дан в соответствующих главах.

## Режим подземных вод при опытных откачках из неограниченных напорных водоносных горизонтов в рыхлых отложениях

В напорном изолированном пласте понижения уровня формируются в результате проявлений упругого режима подземных вод. Зависимость между понижением уровня и временем описывается уравнением Тейса, имеющим следующий вид [182]:

$$S = -\frac{Q}{4\pi km} E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \qquad (1.1)$$

где $S$ — понижение напора на расстоянии $r$ от скважины, из которой проводится откачка, через время $t$ после начала откачки;

$Q$ — дебит откачки;

$km$ — водопроводимость водоносного горизонта;

$a$ — коэффициент пьезопроводности;

$E_i$ — интегральная показательная функция.

Через определенное время (тем большее, чем больше расстояние от скважины, в которой фиксируется понижение, до скважины из которой проводится откачка) интегральная функция $E_i$ становится практически равной логарифмической функции, и понижение уровня со временем связывается логарифмической зависимостью [183]:

$$S = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{2{,}25at}{r^2}. \qquad (1.2)$$

Время, по истечении которого допустима замена интегральной функции логарифмической, получило название времени наступления квазистационарного режима, а зона, в которой действует логарифмическая зависимость между понижением и временем, — зоны (области) квазистационарного режима. Отличительной особенностью этой зоны является одинаковый темп снижения уровня во всех точках, расположенных в ее пределах. Другими словами, в этой зоне кривые депрессии во времени перемещаются параллельно самим себе.

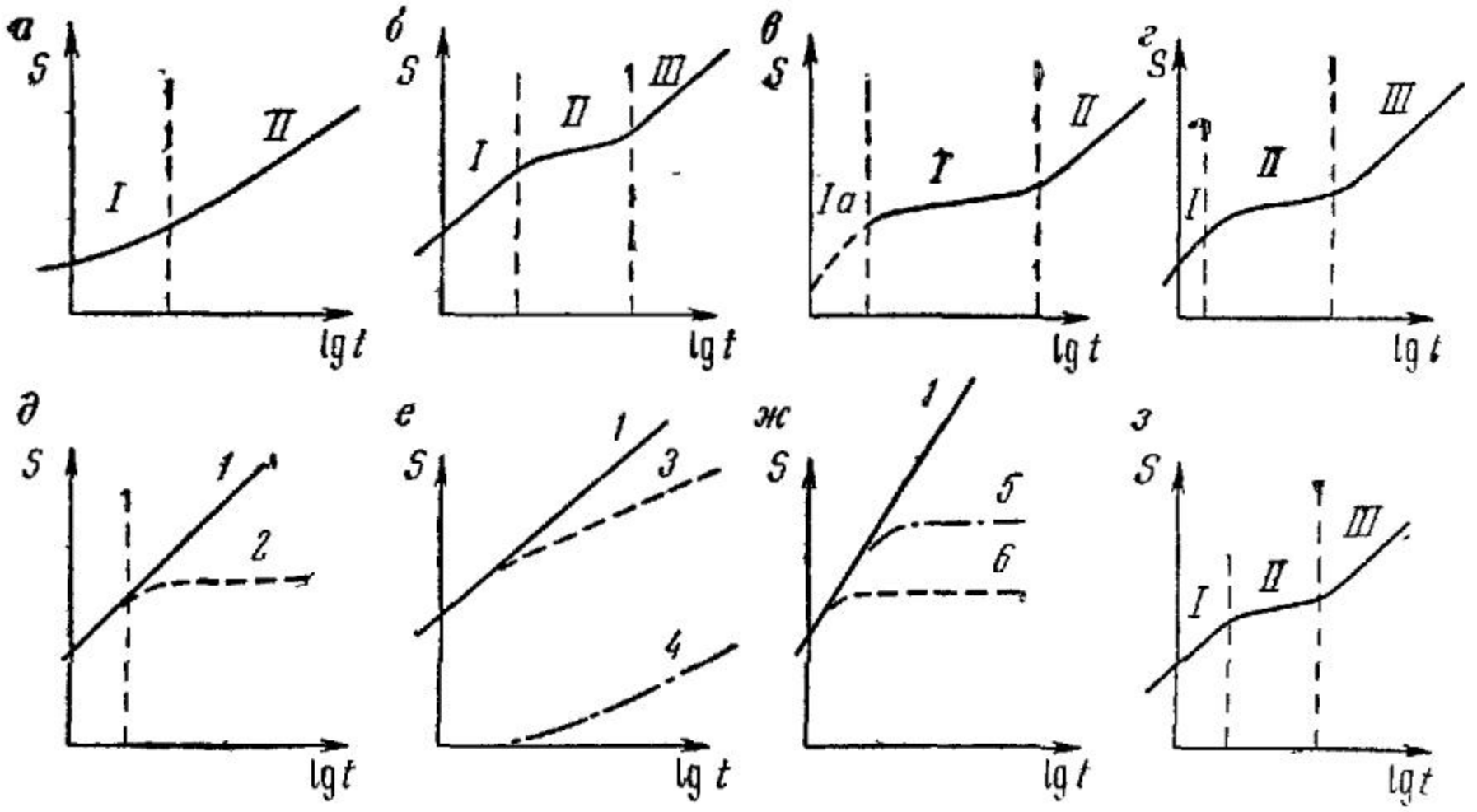



Рис. 1. Закономерности изменения уровня при откачках в типовых гидрогеологических условиях:

*а* — неограниченный напорный однородный пласт; *б* — безнапорный пласт; *в* — трещинный и трещинно-карстовый пласты; *г* — двухслойная толща с изменяющимся напором в верхнем слое; *д* — слоистая толща с постоянным напором в верхнем слое; *е* — слоистая толща с разделяющим водоупором при переменном напоре в верхнем слое; *ж* — водоносный пласт у реки; *з* — пласт с границей неоднородности по водоотдаче (напорно-безнапорный пласт). *1* — по Тейсу; *2* — при перетекании; *3* — при перетекании в опробуемом горизонте; *4* — при перетекании в питающем горизонте; *5* — при несовершенной связи с рекой; *6* — при совершенной связи рекой

Время наступления ($t_0$) и радиус зоны ($r_0$) квазистационарного режима могут быть определены по формулам:

$$t_0 \geqslant \frac{2{,}5r^2}{a}, \tag{1.3}$$

$$r_0 = 0{,}63\sqrt{at}. \tag{1.4}$$

Таким образом, в напорном изолированном пласте понижение уровня через определенное время после начала откачки связано с логарифмом времени прямолинейной зависимостью. Это положение послужило основой графоаналитического метода определения расчетных параметров путем анализа графиков $S$ — lg $t$. Ход изменения уровня в напорном изолированном пласте в полулогарифмическом масштабе показан на рис. 1, *а*. На графике $S = f$ (lg $t$) выделяются два участка. На первом участке ($I$) точки графика не ложатся

на прямую линию. Этот участок отвечает периоду времени, когда логарифмическая зависимость между понижением уровня и временем не действует. Второй (*II*), прямолинейный, участок графика отражает закономерности изменения понижения при квазистационарном режиме. Продолжительность первого периода в напорных водоносных горизонтах обычно невелика (при расположении наблюдательных скважин на расстоянии до 100 м от центральной она не превышает 0,5—1,0 суток и достигает нескольких суток при расстоянии, превышающем 300—500 м).

### Режим подземных вод при опытных откачках из безнапорных водоносных горизонтов в рыхлых отложениях

При откачках из безнапорных водоносных горизонтов понижения уровней формируются под влиянием осушения пласта и для них в целом характерны те же закономерности, что и для напорных изолированных горизонтов. Однако в первые периоды откачки режим движения подземных вод осложняется некоторыми специфическими факторами, из которых основными являются изменение действующей водоотдачи во времени и проявление вертикальных составляющих скорости фильтрации у скважины. В связи с этим зависимость между приведенным понижением уровня $\overline{S}$ * и логарифмом времени имеет более сложный вид, чем для напорных вод.

В общем случае на графике $\overline{S} = f(\lg t)$ выделяются три участка (см. рис. 1, *б*). В первый период откачки понижение формируется практически так же, как в напорном изолированном пласте с упругой водоотдачей. Строго говоря, этот участок должен состоять из двух периодов — периода, который соответствует экспоненциальной зависимости, и периода, когда понижение связано со временем логарифмической зависимостью. Однако на практике продолжительность этого участка измеряется минутами, поэтому первый участок может или совсем не выделяться, или может выделяться только его логарифмическая часть.

Во второй период откачки происходит резкое выполаживание графика, вызванное замедлением темпа снижения уровня в процессе формирования гравитационной водоотдачи. Этот эффект, который получил в литературе название эффекта Болтона, описывается уравнением Джейкоба — Хантуша для напорных пластов с перетеканием **. Характерной особенностью этого периода является практическая стабилизация уровня к его концу. В связи с этим второй период получил название периода ложностационарного режима. Продолжительность этого периода зависит от коэффициента фильтрации водоносного горизонта, его водоотдачи и мощности, и, как

---

* Приведенное понижение $\overline{S}$ — понижение с учетом изменения мощности водоносного горизонта. $S = S(2H - \overline{S})$.

** Закономерности режима подземных вод при откачках из пластов с перетеканием будут рассмотрены при анализе слоистых толщ.

показывает опыт откачек из безнапорных горизонтов, составляет в большинстве случаев несколько суток. Наличие периода ложностационарного режима предъявляет особые требования к методике опытных откачек. Если откачка будет закончена до начала третьего периода, то могут быть сделаны качественно неверные выводы о практической стабилизации движения, вызванной, например, влиянием взаимосвязи подземных и поверхностных вод.

Последний третий участок графика $S = f(\lg t)$ соответствует логарифмической аппроксимации уравнения Тейса при гравитационной водоотдаче. Таким образом, в безнапорных водоносных горизонтах в рыхлых отложениях, в отличие от напорных пластов, квазистационарный режим при гравитационной водоотдаче формируется с определенным запаздыванием.

Следует отметить, что физическая сторона процессов, осложняющих закономерности изменения уровня подземных вод во времени, изучена совершенно недостаточно. Анализ фактических данных показывает, что первые два участка графика формируются далеко не во всех случаях. В то же время неизученность процессов изменения водоотдачи, отсутствие строгих теоретических решений не позволяют заранее предсказать условия, в которых могут возникать эти осложнения.

## Режим подземных вод при опытных откачках из водоносных горизонтов в трещиноватых породах

Процессы движения подземных вод в трещиноватых породах как в напорных, так и безнапорных условиях характеризуются рядом специфических особенностей по сравнению с фильтрацией в зернистых породах. Наибольшее влияние на закономерности изменения понижения уровня в трещиноватых породах оказывает так называемый эффект «двойной пористости», связанный с различным влиянием двух типов пустот (пор и трещин, крупных и мелких трещин). Наличие эффекта «двойной пористости» объясняется изменением действующей водоотдачи во времени и приводит к деформациям графика $S = f(\lg t)$, на котором в общем случае выделяется два участка (не считая участка, связанного с влиянием внешних границ пласта). Первый участок (см. рис. 1, *в*) пологий или практически горизонтальный (иногда с крутой левой ветвью *Ia*) возникает в результате проявления эффекта «двойной пористости» трещиноватых пород и связанного с ней характерного времени запаздывания. Второй участок более крутой, обычно практически прямолинейный, соответствует периоду, когда движение подземных вод в трещиноватых породах подчиняется тем же законам, что и в пористых пластах.

В целом характер графиков $S = f(\lg t)$ в трещиноватых породах и при эффекте Болтона в безнапорных пластах аналогичен.

## Режим подземных вод при опытных откачках при двухслойном строении водоносной толщи

Двухслойная толща, состоящая из двух пластов, характеризующихся различными фильтрационными и емкостными свойствами, довольно характерна для артезианских бассейнов платформенного типа и месторождений, приуроченных к речным долинам. Можно выделить два типа строения двухслойных толщ. Первый тип характеризуется обычно неглубоким залеганием основного водоносного горизонта, который перекрывается другим водоносным горизонтом, содержащим безнапорные воды. Перекрывающий горизонт представлен, как правило, разнородными по составу отложениями (супеси, суглинки, пески) и отличается меньшей водопроницаемостью, но значительно большей водоотдачей по сравнению с основным напорным пластом. Двухслойная толща второго типа характеризуется наличием основного напорного водоносного горизонта, перекрытого мощной толщей глинистых отложений.

На рис. 1, *г* показаны закономерности изменения понижения уровня во времени при откачках из двухслойной толщи первого типа. Как видно из этого рисунка, на графике $S = f(\lg t)$ выделяется три периода, аналогичные периодам, рассмотренным при анализе откачек из безнапорных горизонтов в рыхлых отложениях при наличии эффекта Болтона. В течение первого периода движение происходит практически так же, как в изолированном напорном горизонте, второй период характеризуется так называемым ложностационарным режимом, при котором происходят очень незначительные изменения, и, наконец, в течение третьего периода фильтрация происходит так же, как в изолированном пласте с коэффициентом водопроводимости нижнего слоя и коэффициентом водоотдачи верхнего. Продолжительность отдельных периодов зависит главным образом от коэффициента фильтрации, мощности и водоотдачи верхнего слоя, а также от расстояния между наблюдательной скважиной и центральной.

Во многих случаях, особенно для дальних наблюдательных скважин, первый период вообще не фиксируется, и на графике выделяется только второй или второй и третий периоды. Расчеты по второму периоду без учета влияния верхнего слоя, так же как и при наличии эффекта Болтона или двойной пористости в трещиноватых породах, могут привести к резкому завышению водопроводимости и даже к качественно неверным выводам (например, о практической стабилизации движения).

Как показывает анализ фактического материала и теоретических закономерностей движения подземных вод в двухслойной толще, в реальных природных условиях, когда коэффициенты фильтрации верхнего горизонта превышают 0,1 м/сутки, третий период откачки начинается через 10—15 суток после пуска скважины. В то же время при малых значениях коэффициента фильтрации верхнего слоя это время может измеряться сотнями суток.

При откачках из двухслойной толщи второго типа теоретически вид графиков $S = f(\lg t)$ должен быть аналогичен соответствующим графикам для двухслойной толщи первого типа. Однако в связи с малыми значениями упругой водоотдачи и коэффициентов фильтрации перекрывающих глинистых пород период ложностационарного режима при практикуемой продолжительности откачек обычно не наступает. Поэтому закономерности изменения уровня в рассматриваемых условиях практически такие же, как в напорных изолированных пластах, и, как правило, обнаружить перетекание при опытных откачках не удается.

## Режим подземных вод при опытных откачках при многослойном строении водоносной толщи

Случай многослойного строения водоносной толщи (чередование водоносных и слабопроницаемых слоев) является наиболее типичным для артезианских бассейнов платформенного типа, а также для месторождений, приуроченных к конусам выноса. В этих условиях при раздельной эксплуатации отдельных водоносных горизонтов в формировании эксплуатационных запасов подземных вод большую роль могут играть процессы перетекания через разделяющие слабопроницаемые отложения. Масштаб влияния этих процессов на режим подземных вод при опытных откачках можно проследить при анализе графиков $S = f(\lg t)$, показанных на рисунках 1, *д* и 1, *е*. При этом на рис. 1, *д* показаны закономерности изменения понижения уровня в эксплуатируемом водоносном горизонте в условиях постоянства напора в питающем пласте, а на рис. 1, *е* — в условиях изменяющегося напора.

Как следует из рис. 1, *д*, при перетекании с постоянным уровнем в питающем пласте происходит выполаживание графика $S = f(\lg t)$ и его последующая стабилизация. Продолжительность первого периода откачки, при котором снижение уровня происходит как в неограниченном изолированном пласте, зависит от фильтрационных и емкостных свойств опробуемого водоносного горизонта, коэффициента фильтрации и мощности разделяющего слабопроницаемого слоя, а также от расстояния между центральной и наблюдательной скважинами.

Численный анализ зависимостей, определяющих закономерности движения подземных вод к скважинам в слоистых системах с постоянным уровнем в питающем слое, показал, что в реальных природных условиях продолжительность этого периода измеряется десятками и сотнями суток и значительно превышает обычную продолжительность опытных откачек. Исключение составляют главным образом многослойные системы, в которых разделяющие слабопроницаемые отложения представлены суглинками или песчаными глинами с коэффициентом фильтрации $10^{-2}$—$10^{-3}$ м/сутки и мощностью не более 20—30 м. В этих условиях уже через несколько суток после начала откачки происходит выполаживание графика $S - \lg t$ и

достигается стабилизация уровня. Как показали исследования Ф. М. Бочевера [29], время практической стабилизации определяется упругой водоотдачей $\mu^{\times}$ опробуемого горизонта и коэффициентом сопротивления разделяющего слоя (значение величины $\frac{K_0}{m_0}$, где $K_0$ — коэффициент фильтрации разделяющего слоя, а $m_0$ — его мощность). Так, при $\mu^{\times} = 10^{-3}$ и $\frac{K_0}{m_0} = 10^{-5}$ это время составит 300—500 суток, а при $\mu^{\times} = 10^{-4}$ и $\frac{K_0}{m_0} = 10^{-5}$ соответственно 30 — 50 суток.

На рис. 1, *е* показаны кривые изменения уровней в верхнем и нижнем горизонтах для случаев, когда в питающем водоносном пласте происходит изменение напора. В целом в первый период откачки закономерности изменения понижения уровня в опробуемом горизонте такие же, как для условий постоянства уровня. Однако, в отличие от предыдущего случая, в рассматриваемых условиях стабилизации движения при откачке не происходит, хотя наблюдается уменьшение темпа падения уровня по сравнению с изолированным пластом. Величина снижения уровня в водоносном горизонте, из которого происходит перетекание, в период времени, соответствующий опытным работам, как правило, незначительна. При этом увеличение понижения в этом горизонте происходит при уменьшении сопротивления разделяющего слоя $\left(\text{величины } \frac{K_0}{m_0}\right)$ и уменьшении водоотдачи горизонта, из которого происходит перетекание.

Таким образом, постановка опытных работ для изучения взаимосвязи водоносных горизонтов в многослойных толщах целесообразна только в редких случаях, когда имеются геологические предпосылки к перетеканию, например гидравлические окна. При проведении таких опытных работ необходимо организовать наблюдения за уровнем и в горизонте, из которого может происходить перетекание. В то же время, так как процессы перетекания сказываются только через значительное время после начала откачки, для определения основных гидрогеологических параметров могут быть использованы зависимости, не учитывающие перетекания из смежных водоносных горизонтов.

## Режим подземных вод при откачках из водоносных горизонтов, связанных с поверхностными водотоками и водоемами

Основными факторами, определяющими режим подземных вод при откачках из водоносных горизонтов, гидравлически связанных с поверхностными водотоками и водоемами, являются сработка части естественных запасов подземных вод (осушение пласта) и привлечение поверхностного стока. В первый период откачки определяющим является первый процесс (осушение пласта) со всеми закономерностями, описанными в предыдущих разделах. В это время

происходит постоянное увеличение понижения уровня подземных вод. Через некоторое время после начала откачки на режим подземных вод начинает оказывать влияние наличие плановой границы (реки или водоема), которое выражается в уменьшении темпа падения уровня с дальнейшей полной стабилизацией движения подземных вод. Время стабилизации определяется водоотдачей и водопроводимостью опробуемого горизонта, расстоянием от скважины до реки и главным образом величиной суммарного сопротивления ложа реки (водоема). Это сопротивление в свою очередь зависит от параметров слабопроницаемого слоя в русле реки (его мощности и коэффициента фильтрации), ширины реки, водопроводимости опробуемого горизонта, а также от глубины вреза реки в водоносный горизонт. На рис. 1, *ж* показаны закономерности изменения понижения уровня подземных вод при откачке вблизи реки для случая совершенной * и несовершенной связи подземных и поверхностных вод. Для сравнения на этом же рисунке показана зависимость, отвечающая неограниченному пласту (без учета эффекта Болтона).

Анализ графиков, изображенных на рис. 1, *ж*, показывает, что движение подземных вод в рассматриваемых условиях довольно быстро приобретает установившийся характер. При совершенной взаимосвязи подземных и поверхностных вод стационарный режим фильтрации в реальных условиях отмечается обычно уже через несколько часов после начала откачки. В то же время сопротивление русловых отложений приводит как к увеличению абсолютного значения понижений, так и к бóльшей продолжительности периода неустановившейся фильтрации. Продолжительность этого периода главным образом зависит от коэффициента фильтрации слабопроницаемого слоя и его мощности и может составлять несколько месяцев.

Приведенные на рис. 1, *ж* кривые характеризуют закономерности изменения уровня при подпертом режиме фильтрации, т. е. при отсутствии полного отрыва уровня от подошвы слабопроницаемого слоя. В том случае если при откачке произойдет полный отрыв уровня подземных вод от подошвы слабопроницаемого слоя и река окажется «подвешенной», продолжительность периода неустановившейся фильтрации значительно возрастет, а при эксплуатации подземных вод береговыми водозаборами, представленными линейными рядами скважин большой протяженности, стабилизация вообще может не наступить. В связи с этим очень важно при опытных откачках установить, при каких условиях подпертая фильтрация будет сменяться свободной. Для этого необходимо иметь данные об изменении уровней подземных вод в процессе откачки не только в районе опытной скважины, но и на урезах реки.

Следует отметить, что определение сопротивления русловых отложений является важнейшей задачей опытных откачек в рассматриваемых условиях

---

* Под совершеной связью принято понимать полный врез русла реки в водоносный горизонт и отсутствие экранирующей кольматации.

## Режим подземных вод при откачках из водоносных горизонтов, ограниченных непроницаемыми контурами

При откачке из скважины, расположенной вблизи от непроницаемой границы (границ) пласта, через определенное время после ее начала на закономерности изменения уровня начинает оказывать влияние граница пласта. При этом в зависимости от количества действующих границ, их взаимного расположения, размещения центральной и наблюдательных скважин, влияние границ проявляется по-разному, но во всех случаях приводит к увеличению темпа падения уровня по сравнению с предшествующим периодом и к деформациям конечных участков графиков $S - \lg t$. Время, при котором влияние непроницаемой границы (границ) практически не сказывается, зависит от расстояния скважин до границы и коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности).

Вид деформируемых участков зависит от количества границ пласта и их взаимного расположения. Так, в тех случаях, когда понижение формируется в результате влияния только одной непроницаемой границы пласта, на графике $S - \lg t$ будет отмечаться конечный прямолинейный участок, уклон которого вдвое больше, чем уклон предыдущего участка. Если в области влияния откачки окажутся две непроницаемые взаимно перпендикулярные границы («пласт — квадрант»), то также сохранится прямолинейность последнего участка, но темп падения уровня будет уже в четыре раза большим, чем в неограниченном пласте.

В том случае когда на понижение уровня начинают оказывать влияние две параллельные непроницаемые границы («пласт — полоса»), понижение связывается со временем степенной зависимостью $S = f(\sqrt{t})$. В этих условиях на графиках $S - \lg t$ появляется криволинейный участок, обращенный выпуклостью к оси $\lg t$. Такой же характер будет иметь конечный участок графика $S - \lg t$ и при наличии кругового непроницаемого контура, в условиях которого понижение со временем связано прямолинейной зависимостью.

Так как влияние границ значительно осложняет определение гидрогеологических параметров, при проектировании откачек следует стремиться так назначать местоположение опытного куста и продолжительность откачки, чтобы можно было получить представительный участок графика $S - \lg t$ без влияния границы. Однако следует помнить, что во многих случаях, когда исключить влияние границ практически невозможно, при обработке данных откачек необходимо пользоваться зависимостями, полученными с учетом влияния границ.

В то же время для оценки роли границы (установления ее непроницаемости или слабой проницаемости) продолжительность откачки должна быть достаточной для получения участка, на котором сказывается влияние границы.

## Режим подземных вод при откачках из водоносных горизонтов, состоящих из отдельных зон с различными водопроводимостью и (или) водоотдачей

В случае если опытная откачка проводится из скважины, расположенной вблизи границы с зоной, характеризующейся другими по сравнению с опробуемой водопроводимостью или водоотдачей, то, как и в рассмотренных ранее ограниченных пластах, происходит изменение темпа падения уровня в связи с влиянием этой границы. Рассмотрим два наиболее часто встречающихся случая.

1. Водоносный горизонт состоит из двух зон, существенно отличающихся по водопроводимости, но с примерно равной водоотдачей. Эти условия характерны для напорных водоносных горизонтов.

2. Водоносный горизонт состоит из двух зон с примерно равной водопроводимостью, но существенно отличающихся по водоотдаче. Такие случаи встречаются при откачках вблизи области выхода пласта на поверхность, когда водоносный горизонт в области выхода приобретает безнапорный режим. В этих условиях в напорной части пласта действует упругая водоотдача, а в безнапорной — гравитационная, которая на несколько порядков может отличаться от упругой.

Закономерности изменения уровня в первом из рассматриваемых случаев, когда откачка происходит из зоны с более высокой водопроводимостью, практически аналогичны закономерностям при откачках из пластов, ограниченных одним непроницаемым контуром. И в этом случае на графике $S - \lg t$ будет выделяться конечный прямолинейный участок, уклон которого превышает уклон предыдущего участка и зависит от соотношения водопроводимостей обеих зон. Время, при котором влияние границы практически не сказывается, как и прежде, зависит от расстояния до границы и коэффициента пьезопроводности опробуемой зоны.

В зависимости от времени откачки и расположения наблюдательной скважины по отношению к центральной и к границе пласта на графике $S - \lg t$ могут выделяться один или два прямолинейных участка.

Если наблюдательные скважины расположены на небольших расстояниях от центральной, то при небольшой продолжительности откачки может быть только один участок, отвечающий параметрам опробуемой зоны без влияния границы. При большей продолжительности откачек и для более удаленных наблюдательных скважин на графике выделяются оба прямолинейных участка. Если же наблюдательная скважина расположена ближе к границе раздела, чем к центральной скважине, на графике может выделяться только один прямолинейный участок, уклон которого зависит от параметров обеих зон.

Закономерности изменения уровня во времени при наличии границы раздела по водоотдаче значительно сложнее. Типовой график $S - \lg t$ для откачки из скважины, расположенной в напорной

зоне вблизи границы с безнапорной, приведен на рис. 1, *з*. На графике выделяются три участка, аналогичные соответствующим участкам графиков для двухслойной толщи или безнапорных горизонтов при эффекте Болтона. В течение первого периода движение происходит так же, как в неограниченном напорном пласте. Продолжительность этого периода зависит от расстояния скважины до границы и коэффициента пьезопроводности опробуемой зоны. При расположении скважины в 1—2 км от границы это время обычно не превышает нескольких суток. Второй период характеризуется так называемым ложностационарным режимом, при котором темп снижения уровня значительно замедляется. Продолжительность этого периода составляет сотни и тысячи суток. И, наконец, третий период характеризуется увеличением темпа снижения уровня. На этом отрезке времени темп изменения уровня становится таким же, как и на первом участке. При близком расположении опытной скважины от границы безнапорной зоны продолжительность первого периода может быть очень маленькой и на полулогарифмическом графике отмечается только участок, соответствующий второму периоду.

## Режим подземных вод при опытных откачках из водоносных горизонтов с локальными очагами питания и разгрузки

При откачках из водоносных горизонтов с локальными очагами питания и разгрузки закономерности изменения уровня во времени осложняются процессами привлечения дополнительного питания.

В зависимости от соотношения величины естественной разгрузки и дебита скважины, а также расстояния скважины от контура разгрузки дополнительное питание за время откачки может или полностью компенсировать водоотбор, или только его определенную часть.

В первом случае будет отмечаться нарушение прямолинейности графика $S$ — lg $t$, постепенное выполаживание графика и в некоторых условиях стабилизация движения подземных вод. Во втором случае — прямолинейная форма конечного участка графика сохраняется, но темп падения уровня уменьшается по сравнению с первоначальным периодом, когда дополнительное питание практически не привлекалось.

Охарактеризованные закономерности режима подземных вод при опытных откачках в различных гидрогеологических условиях должны обязательно учитываться при проектировании опытных откачек и их проведении, а также при интерпретации данных опытных работ. Анализ режима подземных вод при опытных откачках показывает, что одни и те же закономерности изменения уровня во времени могут быть вызваны самыми разнообразными причинами. Так, наличие периода ложностационарного режима может быть вызвано и эффектом Болтона в безнапорных горизонтах, и осушением пласта в безнапорной зоне в области его выхода на поверхность, и перетеканием в двухслойной толще, и эффектом «двойной пористости»

и т. д. К одним и тем же последствиям может привести и наличие зоны с большей водопроводимостью в плане, и перетекание из смежных водоносных горизонтов, и привлечение поверхностных вод.

Анализ графиков изменения уровня подземных вод при откачках во времени показывает также, что в различных гидрогеологических условиях влияние отдельных природных факторов, формирующих понижение уровня при постоянном дебите, проявляется по-разному. Некоторые факторы проявляются практически сразу после начала откачки, другие факторы начинают влиять через очень продолжительное время и практически не могут быть изучены в процессе опытных работ. Меняются закономерности изменения уровня подземных вод и в зависимости от положения наблюдательных скважин по отношению к опытным скважинам и плановым границам горизонтов. Все эти обстоятельства необходимо учитывать как при проектировании опытных работ, так и при обработке их данных.

Глава 2

# РАСЧЕТНЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК

## 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Одна из основных целей опробования водоносных горизонтов откачками — определение расчетных гидрогеологических параметров.

Под п а р а м е т р о м в технике понимается величина, характеризующая то или иное свойство какого-либо явления, устройства, установки и т. д. Водовмещающие породы, которыми сложены водоносные горизонты, представляют собой пористые среды. Основными свойствами пористой среды, определяющими условия движения в ней жидкости, являются ее п о р и с т о с т ь и п р о н и ц а е м о с т ь. Поэтому естественно, что основные расчетные гидрогеологические параметры водоносного горизонта должны отражать именно эти два свойства водовмещающей среды, т. е. ее емкостные и фильтрационные свойства.

Водовмещающая пористая среда может быть зернистой, трещиноватой, трещинно-карстовой и т. п. Поэтому в данной работе под термином пористость мы понимаем общую пустотность горной породы независимо от типа самих пустот.

Практически все водовмещающие породы характеризуются беспорядочным распределением пустот. Поэтому структура пород может быть описана только статистически.

Однако ввиду сложности строения пористой среды условия движения жидкости в ней обычно рассматриваются с макроскопической точки зрения, а реальная водовмещающая порода заменяется некоторой условной сплошной средой с непрерывными свойствами.

При таком подходе пористость и проницаемость горной породы и связанные с ними основные расчетные гидрогеологические параметры водоносных горизонтов должны рассматриваться как макроскопические параметры, характеризующие собой только относительно большие объемы исследуемой среды.

Пористость водовмещающей горной породы $n$ определяет собой часть ее объема, заполненную водой, и выражается как отношение объема пустот к общему объему породы.

Однако характеристикой емкостных свойств водовмещающей среды является не полная пористость, а коэффициент гравитационной водоотдачи породы μ, т. е. то количество воды, которое может высвобождаться из элементарного объема пласта при его осушении.

Под коэффициентом водоотдачи принято понимать разность между общей пористостью и максимальной молекулярной влагоемкостью $W_м$ с учетом объемных весов скелета и воды:

$$\mu = n - \frac{\Delta_{ск}}{\Delta_в} W_м, \tag{2.1}$$

где $\Delta_{ск}$ и $\Delta_в$ — соответственно объемный вес скелета и воды.

Обычно принимается, что величина водоотдачи равна активной пористости $n_0$. При напорной фильтрации осушения породы не происходит, и емкостные свойства водоносного горизонта определяются упругостью водовмещающих пород и заключенной в них жидкости.

По аналогии со свободной водоотдачей при осушении пород для характеристики емкостных свойств напорного пласта Ф. М. Бочевер предложил понятие упругой водоотдачи μ*.

Коэффициент упругой водоотдачи характеризует количество воды, которое может быть получено с единицы площади напорного пласта при понижении пьезометрического напора на 1 м.

В ряде работ при оценке упругой водоотдачи предлагается учитывать также упругие свойства перекрывающих пласт пород [131].

Упругие свойства водоносного горизонта характеризуются по предложению В. Н. Щелкачева [143] коэффициентом упругоемкости (β*)

$$\beta^* = n\beta_в + \beta_с, \tag{2.2}$$

где $\beta_в$ и $\beta_с$ — соответственно коэффициенты упругого сжатия воды и породы.

$$\mu = \Delta_в \cdot \beta^* \cdot m, \tag{2.3}$$

где $m$ — мощность водоносного́ горизонта.

Поскольку объемный вес пресной воды близок к единице, величиной $\Delta_в$ обычно пренебрегают.

Фильтрационные свойства водоносного пласта определяются проницаемостью породы. Проницаемость — это свойство пористого материала пропускать через себя жидкость под действием приложенного градиента давления. Согласно определению Р. Коллинза, проницаемость представляет собой проводимость по отношению к жидкости [64].

Величина проницаемости определяется структурой пористого материала и имеет размерность длины. Параметр, характеризующий проницаемость породы, был впервые введен Дарси в 1856 г., как коэффициент пропорциональности в уравнении, связывающем величину расхода потока с площадью поперечного сечения пласта и пьезометрическим уклоном. Фильтрационные свойства водоносного горизонта определяются свойствами не только водовмещающей породы,

но и фильтрующейся жидкости. Проницаемость породы по отношению к определенной жидкости характеризуется коэффициентом фильтрации. Коэффициент фильтрации представляет собой расход жидкости через единицу площади поперечного сечения пласта при напорном градиенте, равном единице и численно равен скорости фильтрации при единичном градиенте.

Поскольку при решении задач водоснабжения, как правило, рассматривается плановая фильтрация, обычно коэффициент фильтрации заменяется коэффициентом водопроводимости $T = km$. Коэффициент водопроводимости представляет собой расход жидкости через единицу ширины подземного потока мощности $m$ при единичном напорном градиенте. В гидрогеологии коэффициенты фильтрации обычно измеряются в метрах в сутки, а водопроводимости — в квадратных метрах в сутки.

Таким образом, коэффициенты гравитационной или упругой водоотдачи и фильтрации (водопроводимости) являются объективными макроскопическими характеристиками водовмещающей среды относительно заключенной в ней жидкости. Они имеют совершенно четкий физический смысл.

Реальные водовмещающие среды обычно характеризуются неоднородностью фильтрационных и емкостных свойств. Принято различать по размерам неоднородность разных порядков, а также случайную и хаотическую неоднородность (см. главу 10).

Поскольку описанные параметры являются макроскопическими, они всегда осреднены в пределах того или иного опробованного объема пласта. Поэтому для их определения желательно использовать данные, полученные при испытании достаточно большого объема водовмещающей среды. В настоящее время единственным достаточно достоверным методом опробования, отвечающим поставленному условию, является метод откачек (выпусков).

Помимо коэффициентов водопроводимости (фильтрации) и водоотдачи в гидрогеологических расчетах в качестве основного широко используется комплексный параметр $a$, в общем случае характеризующий скорость развития депрессии и получивший название: в безнапорном потоке — коэффициент уровнепроводности $a = \frac{km}{\mu}$; в напорном потоке — коэффициент пьезопроводности $a = \frac{km}{\mu^*} = \frac{K}{\beta^*}$. Размерность коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) — площадь/время. В гидрогеологических расчетах этот параметр обычно измеряется в квадратных метрах в сутки.

Поскольку в основные расчетные зависимости обычно вместо водоотдачи входит коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности), на практике в качестве основных гидрогеологических параметров обычно определяют коэффициенты водопроводимости (фильтрации) и пьезопроводности (уровнепроводности).

Когда эти параметры характеризуют физические свойства некоторого объема водовмещающей среды, их принято называть действи-

тельными [106], или эффективными [143]. Помимо действительных, иногда выделяются обобщенные параметры.

Под обобщенными параметрами В. А. Грабовников и Б. М. Зильберштейн [38] предложили понимать такие параметры, которые комплексно характеризуют опробованный участок водоносного пласта с учетом его водопроводящих и емкостных свойств и влияние внешних границ пласта. Другими словами, при таком подходе реальный пласт заменяется некоторым неограниченным однородным пластом, характер изменения уровня в котором эквивалентен достигнутому при опыте в природных условиях.

Естественно, что величина обобщенных параметров может зависеть от продолжительности опыта, местоположения опытных и наблюдательных скважин относительно границ, величины дебита, соотношения величины суммарного дебита и его доли, обеспеченной дополнительным питанием.

Следовательно, обобщенные параметры не являются параметрами пласта в объективном смысле. Их следует рассматривать как некоторые гидравлические показатели, характеризующие реакцию опробуемого участка водоносного горизонта на данное возмущение.

Помимо основных в гидрогеологических расчетах используется целый ряд специфических параметров, определяющих степень и характер взаимосвязи исследуемого водоносного горизонта с окружающей средой. К этой группе прежде всего относятся параметр перетекания (в слоистых толщах) и параметр, комплексно характеризующий сопротивление закольматированного слоя русловых отложений в поверхностных водотоках и водоемах и несовершенство врезa русловых отложений. Подробнее эти параметры будут охарактеризованы ниже в специальных главах.

## 2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Современные методы определения гидрогеологических расчетных параметров базируются на уравнениях неустановившегося движения подземных вод. В частных случаях, при стационарном, квазистационарном и ложностационарном режиме фильтрации такие параметры, как коэффициенты водопроводимости и фильтрации, могут определяться по формуле Дюпюи. В зависимости от характера опытной информации, используемой для обработки тем или иным методом, все существующие методы можно подразделить на две группы. В методах первой группы используются закономерности режима подземных вод при откачках, определяемые только фильтрационными и емкостными свойствами опробуемых водоносных горизонтов. Этими методами определяются основные расчетные параметры — коэффициенты водопроводимости или фильтрации, пьезопроводности или уровнепроводности, водоотдача. Методы второй группы используют опытные закономерности, определяемые

не только фильтрационными и емкостными свойствами опробуемых водоносных горизонтов, но и их граничными условиями в плане и разрезе. С помощью этих методов, кроме основных, определяются в конкретных случаях и такие специфические параметры, необходимые для подсчета эксплуатационных запасов, как коэффициент перетекания, величины, характеризующие дополнительное гидравлическое сопротивление дна водоемов и водотоков и другие.

Методы первой группы основаны на использовании основного уравнения неустановившейся фильтрации в неограниченных пластах (формула 1.1) или его логарифмической аппроксимации (1.2), а также на зависимостях, учитывающих специфические особенности строения водовмещающих пород (например, эффект Болтона). В зависимости от приемов обработки этих уравнений можно выделить следующие, наиболее распространенные в литературе и на практике, методы:

1. Метод подбора на основе уравнения (1.1).
2. Метод эталонных кривых (методы Тейса, Болтона и др.).
3. Обработка данных опытных откачек на основании зависимости (1.2) (метод Джейкоба).
4. Обработка данных восстановления уровня с учетом времени откачки (метод Хорнера).

**Метод подбора на основе уравнения Тейса** наиболее полно освещен в работах [132, 41 и др.]. Сущность метода заключается в том, что по известному отношению понижений уровня на два момента времени подбором определяется коэффициент пьезопроводности. По найденному значению коэффициента пьезопроводности с использованием формулы (1.1) рассчитывается коэффициент водопроводимости. Для облегчения подбора В. М. Шестаковым [132] составлен график зависимости отношения понижений от аргумента экспоненциальной функции для различных временных отношений.

**Методы эталонной кривой.** Метод Тейса — метод эталонной кривой на основе уравнения Тейса [182]. В советской литературе он освещен в работах [132, 30]. Эталонная кривая представляет собой график зависимости интегральной показательной функции от безразмерного времени на логарифмической бумаге. График строится по любым заданным значениям величин, входящих в безразмерное время. Для определения основных гидрогеологических параметров эталонная кривая совмещается с эмпирической, которая представляет собой график зависимости опытного понижения от времени на логарифмической бумаге в масштабе эталонного графика. Совмещение производится до удовлетворительного совпадения эталонной и эмпирической кривых при условии сохранения параллельности координатных осей. По сдвигам осей определяются затем основные параметры: по сдвигу вертикальной оси — коэффициент водопроводимости, по сдвигу горизонтальной — коэффициент пьезопроводности. Пределы применимости метода Тейса ограничиваются относительно малыми начальными диапазонами времени $t \leqslant \frac{100r^2}{a}$. Обоснование такого ограничения дано в работе [118]. Метод Тейса

применим для обработки опытных данных, получаемых при постоянном возмущении.

Метод Болтона предназначен для обработки результатов откачек из безнапорных горизонтов. Он основан на уравнении Болтона, учитывающем эффект переменности водоотдачи от упругой до гравитационной [154]. Для обработки опытных данных Болтоном рассчитано семейство эталонных кривых, которые асимптотически приближаются к кривым Тейса в начальные моменты времени при упругой и конечные — при гравитационной водоотдаче. Каждая кривая отвечает определенному отношению $\frac{r}{B}$, где $r$ — расстояние наблюдательной скважины от воэмущающей; $B$ — параметр, аналогичный фактору (коэффициенту) перетекания: Эталонные кривые построены в логарифмическом масштабе. По оси ординат откладывается функция Болтона от аргумента — безразмерного времени, по оси абсцисс — значения этого аргумента. Опытная кривая в координатах понижение — время строится также в логарифмическом масштабе. Опытная и одна из семейства эталонных кривых совмещаются до возможно полного совпадения всей кривой или отдельных ее участков при сохранении параллельности координатных осей. Коэффициент водопроводимости определяется по сдвигу вертикальных, а коэффициент уровнепроводности — по сдвигу горизонтальных осей. Параметр $B$ находится из отношения $\frac{x}{B}$ той эталонной кривой, с которой совпала данная опытная кривая. Для упрощения метода Болтона предложен метод Беркалова, использующий начальные и конечные асимптотические участки [156].

**Метод Джейкоба** основан на логарифмической аппроксимации уравнения Тейса и широко освещен в отечественной и зарубежной литературе [158, 183, 10]. Опытные данные по методу Джейкоба представляются в виде графиков зависимости: понижения от времени, понижения от расстояния, понижения от времени, деленного на квадрат расстояния. Графики строятся на полулогарифмической бумаге. Метод применим в условиях квазистационарного режима по истечении некоторого времени от начала возмущения. В условиях квазистационарности указанные графики прямолинейны, и основные расчетные параметры определяются по их угловым коэффициентам и начальным ординатам. Наступление квазистационарного режима помимо прямолинейности полулогарифмического графика определяется контрольным временем от начала возмущения, вычисляемым для каждой наблюдательной скважины [143]. Поздейшими работами метод Джейкоба был приспособлен для обработки результатов опытных работ при сложном характере возмущения (откачек с переменным дебитом, групповых откачек и т. д.) [22, 143, 158].

Частным случаем метода Джейкоба, использующим зависимость между понижением уровня и логарифмом расстояния, является аналитический метод Дюпюи — Тима, предназначенный для определения коэффициентов водопроводимости и фильтрации по данным

кустовых откачек при стационарном и квазистационарном режиме фильтрации. Для учета гидродинамического несовершенства возмущающих и ближайших наблюдательных скважин при использовании формулы Дюпюи рекомендуется вводить поправки, предложенные Н. Н. Веригиным [32].

Перечисленные методы применяются для обработки результатов наблюдений за понижением уровня. Определение основных расчетных параметров возможно также по данным наблюдений за восстановлением уровня после остановки откачек. Возможность этого впервые показали Тейс и Вензель [178, 182]. Позднее Хорнер предложил метод определения коэффициента водопроводимости по временному прослеживанию остаточного понижения после прекращения возмущения, основываясь на логарифмической аппроксимации уравнения Тейса.

**Метод Хорнера** основан на принципе суперпозиции при квазистационарном режиме фильтрации. Причем последнее условие должно выдерживаться как на стадии понижения, так и на стадии восстановления уровня [164]. Опытные данные по методу Хорнера представляются в виде графика зависимости величины восстановления от сложного времени, построенного на полулогарифмической бумаге. Величина восстановления представлят собой разность между динамическими уровнями, замеренными в текущий момент восстановления и в конце откачки. Сложное время представляет собой сумму продолжительности откачки и текущего времени восстановления, деленную на текущее время восстановления. Коэффициент водопроводимости определяется по угловому коэффициенту полулогарифмического графика восстановления. Впоследствии был предложен способ определения коэффициента пьезопроводности по данным восстановления, а также способы обработки после скачкообразного возмущения [106]; была обоснована также возможность определения основных параметров по ограниченному начальному участку времени восстановления без учета сложного времени [10, 11].

Методы второй группы в свою очередь можно также подразделить на две подгруппы. К первой подгруппе следует отнести методы, при использовании которых так же, как в первой группе, определяются только основные гидрогеологические параметры (коэффициенты водопроводимости или фильтрации, пьезопроводности или уровнепроводности), но по зависимостям, учитывающим влияние границ пласта в плане и разрезе. Ко второй подгруппе относятся методы, в которых наряду с основными параметрами определяются некоторые специфические параметры (козффициент перетекания, сопротивление русловых отложений и др.). Рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы второй группы.

Методы определения основных расчетных параметров при действующих сложных плановых граничных условиях основаны на принципе суперпозиции. Для схем полуограниченных пластов различной конфигурации они базируются на уравнении Джейкоба, для поло-

сообразных пластов — на уравнении Бочевера, для замкнутых пластов — на уравнении Маскета.

В ограниченных пластах сложной геометрии определение основных параметров производится способом, аналогичным методу Джейкоба, т. е. по угловым коэффициентам и начальным ординатам полулогарифмических графиков, при условии наступления квазистационарности. В зависимости от сложности действующих границ в расчетных формулах изменяются числовые коэффициенты [106, 19].

Обработку результатов опробования полосообразных пластов с непроницаемыми границами производят на основе уравнения Бочевера [22]. Опытные данные по этому методу представляют в виде графика зависимости понижения от корня квадратного времени в линейном масштабе. Основные параметры определяются по угловым коэффициентам и начальным ординатам прямолинейного графика. Этот способ применим для ближних наблюдательных скважин [88].

Результаты опробования замкнутого пласта с непроницаемой границей обрабатывают на основе уравнения Маскета. Опытные данные представляются в виде графика зависимости понижения от времени в линейном масштабе. Параметры определяют по начальным ординатам и угловым коэффициентам прямолинейного графика. Этот способ можно использовать при весьма продолжительном времени возмущения [29]. В зарубежной литературе для обработки опытной информации в ограниченных пластах применяются аналитический метод Дитца и эталонный метод Столмана [166].

Наиболее распространенными среди методов второй подгруппы являются методы Ф. М. Бочевера [26, 29], Ю. О. Зеегофера и В. М. Шестакова [53], Е. Л. Минкина [96] для определения сопротивления русловых отложений, методы М. С. Хантуша для определения коэффициента перетекания и метод В. А. Мироненко и Л. И. Сердюкова для определения параметров двухслойной толщи.

Метод Ю. О. Зеегофера — В. М. Шестакова предназначен для определения коэффициента водопроводимости и дополнительной длины потока, эквивалентной гидравлическому сопротивлению русла. Метод применяется для обработки результатов откачек из скважин у реки при стационарном режиме и условии прямолинейности уреза воды в плане [53]. Величина эквивалентной длины потока $\Delta L$ определяется подбором по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах в одном створе. Для облегчения подбора составлены графики и таблицы для схем ограниченной и неограниченной ширины реки. Коэффициент водопроводимости вычисляется затем по понижению в любой наблюдательной скважине с учетом $\Delta L$. Пределы применимости этого метода исследованы в работе [47]. В частности, показано, что при $\frac{L}{\Delta L} = 0{,}1$ ошибка в определении понижения достигает 20—30%.

Метод Ф. М. Бочевера применяется для обработки результатов откачек из скважин у реки при стационарном режиме.

Основным условием применимости данного метода, как и предыдущего, является доказательство того факта, что стабилизация уровня вызвана питанием из реки, а не другими возможными факторами [26, 29].

Метод Бочевера позволяет определить коэффициент водопроводимости и параметр сопротивления русла $\lambda$. Это — величины, необходимые для прогнозного расчета в условиях полуограниченного пласта с границей постоянного напора. Они определяются по данным кустовой откачки при четырех наблюдательных скважинах. Две из них расположены в луче, параллельном реке и удаленном от возмущающей скважины на расстояние, примерно равное расстоянию возмущающей скважины от реки. По этим скважинам определяется коэффициент водопроводимости по формуле Форхгеймера. Две другие скважины размещаются вблизи урезов симметрично средней линии реки и на одном луче с возмущающей скважиной перпендикулярном урезу. По сумме и разности понижений в этих скважинах определяются значения интегральных функций, по аргументам которых в таблице находят $\lambda$. Если на противоположном от возмущающей скважины урезе понижения не отмечается, параметр сопротивления русла можно определить по одной наблюдательной скважине. Для этого вначале определяется величина дополнительного гидравлического сопротивления русла для данной наблюдательной скважины по известному коэффициенту водопроводимости. Затем по величине интегральной функции, равной в этом случае половине дополнительного гидравлического сопротивления, по таблице находят значение аргумента, а по нему — искомый параметр сопротивления русла.

В зарубежной литературе эффективное расстояние до границ постоянного напора производится по методу Хантуша [166].

Метод Е. Л. Минкина основан на использовании формулы Форхгеймера, в которой истинное расстояние от скважины до реки увеличивается на искомую величину $\Delta L$. Величина $\Delta L$ находится подбором по отношению понижений уровней в двух наблюдательных скважинах. При известной величине $\Delta L$ коэффициент водопроводимости определяется по формуле Форхгеймера.

Метод Хантуша предназначен для определения параметров водоносных горизонтов в условиях перетекания. Он основывается на уравнении Хантуша — Джейкоба [163]. По технике обработки опытных данных метод Хантуша подобен методу Тейса — он тоже является методом эталонной кривой. Эталонная кривая по методу Хантуша строится на основе уравнения Хантуша — Джейкоба. Для обработки используется семейство эталонных кривых для ряда значений расстояния от возмущающей скважины, деленного на коэффициент перетекания. Экспериментальная и одна из семейства эталонных кривых, построенные на логарифмической бумаге в одинаковом масштабе, совмещаются до наиболее полного совпадения при сохранении параллельности координатных осей. Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности опробуемого слоя определяются

по сдвигам координатных осей, а коэффициент перетекания — по величине отношения расстояния на коэффициент перетекания той эталонной кривой, с которой совпала анализируемая экспериментальная кривая.

Хантуш разработал также другой метод определения коэффициентов водопроводимости, пьезопроводности и фактора перетекания, основанный на поиске точки перегиба [125]. Обработка опытных данных производится с помощью полулогарифмического графика понижения от времени. Искомые параметры определяются по понижению в точке перегиба, уклону касательной в этой точке, времени перегиба.

Метод В. А. Мироненко, Л. И. Сердюкова предназначен для определения параметров двухслойной толщи без разделяющего водоупора. Этот метод аналитический, он основан на приближенном решении, полученном с помощью метода интегральных соотношений [82]. Определение необходимых параметров — коэффициента водопроводимости нижнего основного водоносного слоя и водоотдачи верхнего, слабопроницаемого слоя производится по данным кустового опробования нижнего слоя. На конечный момент времени по понижениям в двух наблюдательных скважинах определяется коэффициент водопроводимости по формуле Дюпюи. Это приближенное определение впоследствии уточняется. Водоотдача верхнего слоя определяется с помощью условного радиуса влияния, зависящего от времени. Описываемый метод целесообразно использовать при относительно небольшом времени. Аналогичный метод предложен впоследствии для определения параметров более сложной трехслойной толщи с разделяющим водоупором [84]. В зарубежной литературе для обработки опытной информации в условиях установившегося режима в двухслойных толщах рекомендуются методы Хайсмона — Кемпермана и Брюгемана.

К настоящему времени накоплен достаточный опыт использования описанных методов. В отечественной и зарубежной гидрогеологической литературе опубликован ряд обобщающих работ по вопросу о пределах применимости того или иного метода [106, 118, 166, 167]. Общим выводом работ подобного направления можно считать утверждение о том, что определение расчетных гидрогеологических параметров не является столь простым делом, как кажется на первый взгляд. Сложность обработки опытных данных с целью определения расчетных параметров заключается не в технических приемах тех или иных методов, а в доказательстве соответствия опытных закономерностей изменения уровня тем математическим моделям реальных природных условий, которые мы намереваемся использовать для обработки. В этом отношении серьезные опасения возникают по поводу предлагаемых в последнее время в советской и зарубежной литературе экспресс-методов, в которых доказательство указанного соответствия полностью игнорируется. В связи с этим

определяемые экспресс-методами параметры можно использовать лишь для качественных заключений и сопоставительных оценок.

Как было показано в главе 1, закономерности изменения уровня при откачках в раэличных природных условиях неодинаковы. В одних случаях более простые зависимости, определяемые только фильтрационными и емкостными свойствами опробуемого водоносного горизонта, наблюдаются довольно продолжительное время, а затем сменяются более сложными зависимостями, отражающими также влияние неоднородности и границ пласта. В других случаях более простые зависимости практически не фиксируются в связи с очень малой продолжительностью периода, при котором не сказывается влияние границ. И, наконец, в некоторых случаях (при осушении безнапорной зоны, при эффекте Болтона, в условиях двухслойной толщи и др.) более простые закономерности, характеризующие параметры водоносного горизонта, отмечаются на последнем этапе откачки после периода ложностационарного режима.

Все эти особенности и предопределяют выбор метода для расчета основных гидрогеологических параметров. В тех случаях, когда основной целью опытных откачек является определение коэффициента водопроводимости (фильтрации) и пьезопроводности (уровнепроводности) предпочтение, когда это возможно, следует отдавать методам первой группы. Это связано со следующими обстоятельствами. Во-первых, для получения опытных закономерностей изменения уровней, в необходимой степени отражающих влияние границ, требуется большая продолжительность опытных работ. Во-вторых, как это было рассмотрено в главе I, раэличные факторы могут привести к совершенно одинаковым деформациям графиков изменения уровня во времени, что осложняет расшифровку этих графиков и определение причин, вызывающих деформации. В-третьих, даже в тех случаях, когда диагностирование информации, полученной с учетом влияния границ, доступно, использование более сложных моделей имеет большую условность, так как определение искомых основных параметров требует большего количества исходных данных, получение которых с необходимой точностью при современной практике разведочных работ не всегда возможно.

Таким образом, для определения основных расчетных параметров в тех случаях, когда это возможно, целесообразно использовать методы первой группы. Методы второй группы необходимы в тех случаях, когда анализируемые опытные закономерности не имеют участков, не испытывающих влияния границ, а также в тех случаях, когда наряду с основными требуется определение специфических параметров ($B$, $\Delta L$ или $\lambda$ и др.).

Как было показано при краткой характеристике различных методов определения гидрогеологических параметров, в этих методах используются либо данные о понижениях уровня в разных точках пласта на фиксированный момент времени, либо о понижениях уровня в одной точке пласта на несколько моментов времени. Достоверность определения параметров может в большинстве случаев

повышаться при увеличении количества точек, по которым используются данные о понижении уровня. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе метода для определения параметров. Кроме того, одним из основных критериев, определяющих целесообразность применения того или иного метода, является возможность установления соответствия опытной закономерности уравнению, на котором базируется метод обработки.

Рассмотрим с этих позиций методы первой группы, в числе которых наиболее широко известны методы подбора, эталонной кривой Тейса и метод Джейкоба. Наименее целесообразен, очевидно, метод подбора и подобные ему аналитические методы, так как при его использовании соответствие применяемых зависимостей реальным природным условиям практически не контролируется, поскольку определения проводятся всего по двум точкам.

В методах эталонной кривой соответствие принятой зависимости опытным данным решается совмещением эталонной и экспериментальной кривых. Надежность обработки этим методом будет зависеть от исхода этой операции. При отрицательном исходе совмещения, что имеет место при действии различных факторов, вызывающих деформацию опытных закономерностей, дальнейшая интерпретация опытных данных методом эталонной кривой становится неопределенной. Неоднозначность совмещения эталонной и опытных кривых определяется также небольшой величиной изменения понижения во времени в наблюдательных скважинах. Кроме того, метод эталонной кривой, опираясь на динамику уровня в каждой отдельной точке, не позволяет судить о характере понижения в нескольких точках одновременно, а следовательно, исключается возможность контроля параметров, определенных по закономерностям изменения уровня во времени и по площади. Рекомендуемый диапазон времени для применения этого метода в напорных пластах измеряется всего несколькими часами. Таким образом, применение метода эталонной кривой весьма ограничено *. Этих недостатков в значительной степени лишен метод Джейкоба. Он применим при квазистационарном режиме, наступление которого достижимо и надежно контролируемо. Достоверность определяемых параметров контролируется различными способами их определения (по закономерностям изменения уровня во времени и по площади). Дополнительной задачей в связи с использованием этого метода является установление пределов его применимости при отклонении условий производства опытных работ от тех условий, в которых справедлива формула Тейса — Джейкоба. Условия применимости уравнения Тейса — Джейкоба предполагают: постоянство дебита, напорный режим опробуемого неограниченного в плане водоносного пласта, его однородность по мощности и фильтрационным свойствам, совершенство возмущающей и наблюдательных скважин. Если одно или несколько из этих

---

* Все перечисленные недостатки методов подбора и эталонной кривой свойственны также соответствующим методам второй группы.

условий не соблюдается, результатом этого будет деформация прямых графиков временного, комбинированного, а в ряде случаев и площадного прослеживания. Эти деформации или аномалии формы графиков имеют причиной отступление реальных условий от условий, ограничивающих пределы применимости используемой формулы. Этими причинами или факторами аномальности являются конструктивные особенности возмущающих и наблюдательных скважин, характер возмущения (переменность дебита, разновременность пуска скважин при групповой откачке), действующие граничные условия водоносных пластов, характер их скважности (трещинный, поровый). Аномалии графиков прослеживания могут быть явные, т. е. заметные по форме, и неявные. Последние выражаются лишь отклонением от нормы ординат или угловых коэффициентов всего графика. Характерно, что причиной одной и той же аномалии могут быть несколько факторов аномальности разной природы.

Аномальность графиков прослеживания и неоднозначность факторов аномальности осложняет задачу определения основных расчетных параметров, вызывая необходимость интерпретации опытной гидрогеологической информации в качестве обязательной стадии разведочных работ. Содержание интерпретации будет зависеть от присутствия того или иного фактора аномальности при проведении опытных работ. В простейшем случае, когда факторы аномальности отсутствуют и опытные работы производятся в условиях, не противоречащих условиям уравнения Тейса — Джейкоба, интерпретация ограничивается описанными техническими и расчетными операциями. В общем случае, при наличии нескольких факторов аномальности, интерпретация опытных данных заключается: а) в снятии аномалий, обусловленных сложным характером возмущения; б) в диагностировании опытных закономерностей изменения уровня с целью поиска представительного участка графика прослеживания; в) в контроле достоверности параметров. Основные принципы интерпретации удобнее рассматривать в зависимости от действия тех или иных факторов аномальности. К числу основных факторов аномальности относятся: сложный характер возмущения, влияние границ пласта в плане и разрезе, эффект Болтона при опробовании безнапорных водоносных горизонтов, эффект двойной пористости при опробовании трещинных водоносных горизонтов, а также естественных колебаний уровня.

В последующих главах будут рассмотрены основные принципы интерпретации данных опытных работ с учетом перечисленных факторов аномальности.

Глава 3

# ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ НЕОГРАНИЧЕННОГО ОДНОРОДНОГО НАПОРНОГО ВОДОНОСНОГО ПЛАСТА

В неограниченном однородном зернистом напорном водоносном пласте единственным фактором, вызывающим деформацию закономерностей изменения уровня во времени и на площади, являются технические условия проведения опыта (постоянство или переменность дебита, наличие нескольких одновременно и неодновременно включенных скважин и др.). Поэтому в этих условиях наиболее применим метод Джейкоба в его классическом виде. Рассмотрим методику обработки данных опытных работ в напорном неограниченном пласте при различных технических условиях проведеиия опыта.

## 1. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДЕБИТЕ СКВАЖИН

В этом случае обработка данных опытных работ проводится на основании логарифмической аппроксимации формулы Тейса (формула 1.1) [183]:

$$S = \frac{0{,}183Q}{km} \cdot \lg \frac{2{,}25at}{r^2} \left( \text{при } \frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}1 \right).$$

Для получения зависимостей, применяемых для расчета параметров, вышеприведенная формула записывается в виде уравнения прямой в полулогарифмических координатах; понижение (ось ординат) относительно логарифма времени ($\lg t$), расстояния ($\lg r$) и комплексного показателя ($\lg t/r^2$) с соответствующими коэффициентами $A_t$ и $C_t$, $A_r$ и $C_r$, $A_k$ и $C_k$. В зависимости от выбранных координат возможны три способа обработки [158].

1. Способ временного прослеживания изменения уровня. Обработка производится с помощью полулогарифмической прямой вида:

$$S = A_t + C_t \lg t \text{ при } r = \text{const}.$$

Этот способ заключается в прослеживании понижения или восстановления уровня во времени. Расчетные параметры — коэффициенты

водопроводимости и пьезопроводности — определяются по угловым коэффициентам ($C_t$) и начальным ординатам ($A_t$) временных графиков прослеживания $S - \lg t$. Основной информацией для построения графика являются замеры понижения в одной скважине.

2. Способ площадного прослеживания. Обработка опытной информации производится с помощью полулогарифмической прямой вида:

$$S = A_r - C_r \lg r \text{ при } t = \text{const.}$$

Способ заключается в прослеживании изменения уровня в зависимости от расстояния наблюдательных скважин до возмущающей, т. е. по площади опытного участка.

Коэффициент водопроводимости и пьезопроводности определяется по угловым коэффициентам ($C_r$) и начальным ординатам ($A_r$) площадных графиков прослеживания $S - \lg r$.

Основной информацией для построения графика являются единовременные замеры в нескольких наблюдательных скважинах.

3. Способ комбинированного прослеживания. Обработка опытной информации производится с помощью полулогарифмической прямой вида

$$S = A_к + C_к \lg \frac{t}{r^2}.$$

Способ заключается в прослеживании изменения уровня во времени одновременно в нескольких наблюдательных скважинах. Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определяются по угловым коэффициентам ($C_к$) и начальным ординатам ($A_к$) комбинированных графиков прослеживания $S - \lg \frac{t}{r^2}$. Информацией для построения комбинированных графиков прослеживания служат регулярные во времени замеры понижения одновременно в нескольких наблюдательных скважинах.

Как уже указывалось, формула Джейкоба справедлива для условий квазистационарного фильтрационного потока. При этом условии графики временного, площадного и комбинированного прослеживания прямолинейны, а графики площадного прослеживания, построенные на несколько моментов времени, параллельны. Таким образом, при достаточном для практики соответствии опытных закономерностей понижения уравнению Тейса — Джейкоба прямолинейность и параллельность графиков прослеживания является нормой квазистационарного режима. Для нахождения участка временного графика, отвечающего квазистационарному режиму, существует аналитический критерий $t_k$ — контрольное время $t_k = \frac{r^2}{0{,}4a}$, где $r$ — расстояние до наблюдательной скважины, $a$ — коэффициент пьезопроводности.

Расчет коэффициента водопроводимости ($km$) и пьезопроводности ($a$) для напорных и простейших случаев безнапорных водоносных пластов производят по формулам, полученным путем элементар-

ных преобразований формулы Джейкоба — записи ее в виде полулогарифмических прямых. Под простейшими случаями в безнапорном водоносном горизонте предполагается отсутствие эффекта Болтона, о чем будет сказано далее, и когда понижение не превышает 20% мощности водоносного горизонта. Формулы для расчетов коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности (уровнепроводности) помещены в табл. 1.

Таблица 1

| Способ обработки | | |
|---|---|---|
| Временное прослеживание | Площадное прослеживание | Комбинированное прослеживание |
| $S-\lg t$ | $S-\lg r$ | $S-\lg\frac{t}{r^2}$ |
| $km=\frac{0{,}183\,Q}{C_t}$ | $km=\frac{0{,}366\,Q}{C_r}$ | $km=\frac{0{,}183\,Q}{C_к}$ |
| $\lg a=2\lg r-0{,}35+\frac{A_t}{C_t}$ | $\lg a=\frac{2A_r}{C_r}-0{,}35-\lg t$ | $\lg a=\frac{A_к}{C_к}-0{,}35$ |

Начальная ордината $A$ — это отрезок, отсекаемый графиком на оси ординат соответственно при: $\lg t=0$, $\lg r=0$, $\lg\frac{t}{r^2}=0$. Угловые коэффициенты графиков прослеживания определяются отношением $C=\frac{S_2-S_1}{\lg t_2-\lg t_1}$ — для временного, $C=\frac{S_1-S_2}{\lg r_2-\lg r_1}$ — для площадного и $C=\frac{S_2-S_1}{\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_2-\lg\left(\frac{t_1}{r^2}\right)_1}$ для комбинированного прослеживания. Для удобства угловые коэффициенты можно вычислять как разность понижений, принимая $\lg t_2-\lg t_1=1$, $\lg r_2-\lg r_1=1$, $\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_2-\lg\left(\frac{t}{r^2}\right)_1=1$.

Постоянство дебита откачки является одним из обязательных условий применимости формулы Тейса — Джейкоба. Отступление от этого условия является причиной аномалии, т. е. нарушения прямолинейной формы временных и комбинированных графиков прослеживания, нарушение параллельности разновременных площадных графиков. Кроме того, нестабильность возмущения (непостоянство дебита) — неизбежное свойство современной техники производства опытных работ. Поэтому основная задача заключается в нахождении таких приемов обработки опытной информации, которые позволяли бы снимать аномалии, связанные с характером возмущения.

Нестабильность возмущения выражается в виде нерегулярных и регулярных изменений дебита, что определяет специфику дальнейшей обработки на разных стадиях возмущения — при понижении и при восстановлении уровня. Настоящая глава посвящена изложению приемов обработки опытных данных при сложном характере возмущения, который, как уже подчеркивалось, в неограниченном однородном напорном зернистом пласте является единственным фактором аномальности.

## 2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПРИ СЛОЖНОМ ХАРАКТЕРЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА СТАДИИ ПОНИЖЕНИЯ

### Прослеживание понижения при нерегулярных колебаниях дебита

Нерегулярные изменения дебита около некоторой постоянной величины или частые остановки водоподъемников приводят к рассеянию точек на графике прослеживания понижения. Эти отклонения от строгой формы графика вносят элемент субъективности в осреднение экспериментальной совокупности точек, являясь причиной случайных ошибок, так называемых ошибок первичной обработки. В условиях колебания дебита около некоторой постоянной средней величины возникает задача определения среднего дебита и осреднения рассеянной совокупности замеров понижения. Выбор среднего дебита при колебаниях его около постоянной средней не сложен, поэтому основное внимание следует уделить осреднению закономерностей понижения. Это в большей степени относится к временны́м графикам прослеживания понижения. Нерегулярные колебания дебита меньше сказываются на форме графиков площадного прослеживания понижения и еще менее — на форме временны́х и площадных графиков восстановления уровня. Амплитуда колебаний понижения возрастает по мере приближения наблюдательных скважин к возмущающим, достигая максимума в самих возмущающих скважинах. По опыту известно, что обработка опытной информации способом временно́го прослеживания понижения в возмущающих скважинах при откачках эрлифтом в большинстве случаев невозможна, поскольку вероятность получения качественных графиков очень мала. Определение параметров в возмущающих скважинах обычно производят по данным временно́го прослеживания восстановления уровня. В этом разделе речь будет идти о наблюдательных скважинах.

При обработке опытной совокупности точек могут быть два подхода: а) осреднение полной совокупности при наличии видимой корреляционной связи; б) отбраковка части опытной информации на основе анализа причин отклонений и осреднение оставшейся совокупности точек.

В первом случае, когда причиной рассеяния опытных точек является постоянная во времени нестабильность работы водоподъем-

ника, а само рассеяние имеет вид равномерного линейно вытянутого облака точек, обработка опытных данных может производиться достаточно строго по правилам линейной регрессии [141]. Но чаще всего рассеяние опытной совокупности точек неравномерно во времени, и тогда формальное использование коэффициента линейной регрессии приводит к ошибочным результатам. В этих случаях требуется отбраковка части ошибочных или непредставительных замеров. Например, при частых остановках точки, отвечающие замерам, сделанным сразу после остановки, можно отбрасывать, используя только те, которые попадают на продолжение прямой, проведенной по части замеров, полученных до остановки. Следовательно, по облаку точек с видимой корреляционной связью в каждом отдельном случае могут быть два или более варианта осреднения. Разумеется, как бы тщательно ни была выполнена операция осреднения, фактор субъективности остается. В ряде случаев бывает трудно предпочесть какой-либо один из всех возможных вариантов осреднения. Для оценки ошибки первичной обработки, связанной с неопределенностью осреднения опытной совокупности точек, был проведен статистический анализ двух групп коэффициента водопроводимости. Первая группа получена авторами полевых исследований по участкам временного прослеживания понижения. Вторая группа получена независимо от первой другими авторами по тем же графикам прослеживания. При выборе опытных данных соблюдались следующие условия: прямолинейность используемых графиков прослеживания была очевидна; первичную и повторную обработку производили исполнители примерно одинаковой квалификации. Для сопоставления получено 142 пары определений в диапазоне $km = 200 \div 4400$ м²/сутки. По каждой паре значений $km$ определены расхождения. Выполненный анализ рассматривается как эксперимент, в результате которого получена некоторая совокупность независимых и случайных величин, представляющая выборку возможных ошибок из генеральной совокупности. Статистическая обработка этой выборки позволила определить среднюю ошибку первичной обработки $\Delta km = 10\%$. В пределах $\bar{x} \pm \sigma$ ошибка первичной обработки не превышает 25% ($\bar{x}$ — среднеарифметическое и $\sigma$ — среднеквадратическое отклонение логарифмов расхождений). Отсюда вытекает рекомендация для ориентировочной оценки допустимости использования экспериментальной совокупности с рассеянием точек. Следует использовать только такую совокупность экспериментальных точек, которая позволяет установить прямолинейность графика прослеживания. Анализируемая выборка объединяет случаи, когда степень рассеяния еще позволяет установить это. При больших расхождениях установить прямолинейный характер временного графика не удается.

Следовательно, допустимой можно принять такую степень рассеяния точек, при которой относительное расхождение между коэффициентами водопроводимости по крайним вариантам рисовки прямой не превышает 25%.

Осреднив экспериментальную совокупность точек с незакономерными колебаниями дебита около некоторой постоянной величины, дальнейшую обработку производят, как для случая с постоянным дебитом. Таким образом, особенность прослеживания понижения в условиях нерегулярной изменчивости дебита заключается в необходимости отбраковки части информации либо в виде отдельных замеров, либо в виде целых графиков — чаще всего по возмущающим и близким к ним наблюдательным скважинам. В остальном обработка ничем не отличается от нормального случая при постоянном дебите возмущения. Во всех случаях, когда можно вести обработку применительно к условиям постоянного возмущения, пределы применимости способов временного, площадного и комбинированного прослеживания определяются контрольным временем, т. е. должно соблюдаться условие $t > t_к$.

### Прослеживание понижения при регулярных изменениях дебита

Регулярность изменения дебита, заключающаяся в закономерном скачкообразном, линейном или параболическом изменении дебита во времени, вызывает закономерные деформации графиков прослеживания понижения. Деформации исключаются соответствующими приемами обработки. Существенное значение при этом имеет рассредоточенный или сосредоточенный характер возмущения.

*Скачкообразное рассредоточенное возмущение*

В тех случаях, когда одной возмущающей скважиной не достигается необходимый дебит, откачку производят из нескольких возмущающих скважин. Таким образом, скачкообразное рассредоточенное возмущение имеет место при групповой откачке, когда возмущающие скважины удалены друг от друга на расстояния, соизмеримые с расстояниями до наблюдательных скважин.

Групповое асинхронное возмущение

Этот вид возмущения имеет место при разновременном начале или окончании работы нескольких возмущающих скважин, при скачкообразном изменении дебита в отдельных скважинах, а также при совокупности этих процессов на протяжении одного опыта. Основываясь на принципе суперпозиции [143, 158] и рассматривая каждую ступень изменения суммарного дебита группового опыта $\pm \Delta Q_i$ как самостоятельное возмущение, можно представить понижение в любой наблюдательной скважине как сумму понижений от каждого возмущения $\Delta Q$. Путем элементарных преобразований суммы понижений, каждое из которых описывается уравнением Тейса — Джейкоба, получаем следующую формулу [106]:

$$S = \frac{0{,}183 Q_n}{km} \lg \frac{2{,}25 a t_{пр}}{r^2_{пр}}, \qquad (3.1)$$

где $Q_n$ — суммарный дебит системы скважин на данной ступени возмущения;

$t_{пр}$ — приведенное время опыта;

$$\lg t_{пр} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg (t_1 - t_2) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg (t - t_n)}{Q_n},$$

где $Q_1$ — начальный суммарный дебит;

$\Delta Q_i$ — соответствующее изменение суммарного дебита ($i = 1, 2, \ldots, n-1$);

$$\Delta Q_1 = Q_2 - Q_1, \ \ldots, \ \Delta Q_{n-1} = Q_n - Q_{n-1},$$

где $t$ — текущее время опыта от начала работы всей системы;

$t_i$ — время начала соответствующих ступеней суммарного дебита ($i = 1, 2, \ldots, n$).

Знак плюс означает возрастание, минус — уменьшение суммарного дебита.

$r_{пр}$ — приведенное расстояние до интересующей наблюдательной скважины:

$$\lg r_{пр} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n},$$

где $Q_i$ — дебиты отдельных возмущающих скважин на данной ступени возмущения ($i = 1, 2, \ldots, n$);

$r_i$ — расстояния от интересующей наблюдательной до каждой действующей возмущающей скважины.

Знак плюс означает включение, знак минус — остановку соответствующей возмущающей скважины.

Формула (3.1) по виду не отличается от формулы Тейса — Джейкоба, поэтому обработка группового асинхронного опыта производится способом, аналогичным нормальному случаю с постоянным дебитом, т. е. временным, площадным и комбинированным прослеживанием понижения на основе графиков в координатах $S - \lg t_{пр}$, $S - \lg r_{пр}$, $S - \lg \frac{t_{пр}}{r^2_{пр}}$. Обработка производится раздельно для каждой ступени возмущения. Расчетные формулы, полученные из уравнения (3.1), помещены в табл. 2.

### Рассредоточенное синхронное возмущение

Такой характер возмущения имеет место при групповых откачках, когда отдельные возмущающие скважины работают с неравными, но постоянными дебитами, включаются и выключаются одновременно. Этот вариант является частным случаем предыдущего. Способы обработки основаны на формуле (3.1), в которой приведенное время заменяется простым — $t_{пр} = t$. Тогда временное прослеживание можно производить с помощью графика $S - \lg t$, расчет коэффициента водопроводимости — по суммарному дебиту группы

возмущающих скважин $Q_n = \sum Q_i$. Площадное прослеживание производится на основе графика $S - \lg r_{\text{пр}}$, а комбинированное по графику $S - \lg \frac{t}{r_{\text{пр}}^2}$. Как видно, при всех способах обработки в этом варианте по сравнению с предыдущим отпадает необходимость в расчете приведенного времени, определяется лишь приведенное расстояние до каждой наблюдательной скважины. Необходимые расчетные формулы помещены в табл. 2.

**Таблица 2**

| Способ возмущения | Способ обработки: Временное прослеживание | Способ обработки: Площадное прослеживание | Способ обработки: Комбинированное прослеживание | Приведенные величины |
|---|---|---|---|---|
| Групповое асинхронное возмущение | $S - \lg t'$; $km = \frac{0{,}183\,Q_n}{C}$; $\lg a = 2\lg r_{\text{пр}} - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $S - \lg r$; $km = \frac{0{,}366\,Q_n}{C}$; $\lg a = \frac{2A}{C} - 0{,}35 - \lg t'$ | $S - \lg \frac{t'}{r^2}$; $km = \frac{0{,}183\,Q_n}{C}$; $\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | $t' = t_{\text{пр}}$<br>$\lg r_{\text{пр}} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n}$<br>$\lg t_{\text{пр}} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg (t - t_2) \pm \ldots \pm \pm \Delta Q_{n-1} \lg (t - t_n)}{Q_n}$ |
| Рассредоточенное синхронное возмущение | | | | $t' = t$<br>$\lg r_{\text{пр}} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n}$ |

*Сосредоточенное скачкообразное возмущение*

К этому варианту относятся откачки при одной возмущающей скважине, а также групповые откачки с компактным расположением возмущающих скважин, когда можно принять условие примерного равенства логарифмов расстояний до ближайшей наблюдательной

скважины. В предыдущих вариантах скачкообразного рассредоточенного возмущения обработка производится раздельно для каждой ступени возмущения; количество графиков прослеживания по каждой наблюдательной скважине равно в том случае числу ступеней суммарного дебита. При сосредоточенном возмущении можно упростить обработку.

Запишем формулу (3.1) в виде уравнения прямой относительно приведенного понижения $\frac{S}{Q}$;

$$\frac{S}{Q_1} = A_1 + C_1 \lg t - \text{для первой ступени;}$$

$$\frac{S}{Q_n} = A_n + C_n \lg t_{\text{пр}} - \text{для последней ступени.}$$

Заметим, что $C_1 = C_n = \frac{0{,}183}{km} = C$ и $A_1 = A_n = C \lg \frac{2{,}25a}{r^2}$, так как $r = \text{const}$. Ввиду равенства начальных ординат и угловых коэффициентов обе прямые, т. е. графики прослеживания на обеих ступенях, должны совпадать. Легко представить, что будут совпадать и площадные (при $t = t_{\text{пр}} \ldots = t_{\text{пр}} n$), и комбинированные графики прослеживания. При неравенстве моментов времени площадные графики на разных ступенях возмущения будут параллельными, как и при условии $Q = \text{const}$. Таким образом, обработку сосредоточенного скачкообразного возмущения можно производить на основе графиков прослеживания:

$$\frac{S}{Q} - \lg t_{пр}, \quad \frac{S}{Q} - \lg r, \quad \frac{S}{Q} - \lg \frac{t_{\text{пр}}}{r^2}.$$

### Одиночное скачкообразное возмущение

Такой характер возмущения имеет место при кустовых и одиночных откачках из одной возмущающей скважины с несколькими ступенями дебита. Переход с одной ступени на другую производится с небольшим перерывом или без него.

Способы обработки этого варианта следуют непосредственно из уравнения (3.1), если принять $r_{\text{пр}} = r$. Обработка заключается в расчете приведенного времени $t_{\text{пр}}$ по ступеням дебита $\pm \Delta Q_t$. Определение параметров производится на основе графиков:

$$\frac{S}{Q_n} - \lg t_{\text{пр}}, \quad \frac{S}{Q_n} - \lg r, \quad \frac{S}{Q_n} - \lg \frac{t_{\text{пр}}}{r^2}.$$

В расчете приведенного понижения используется дебит анализируемой ступени возмущения $Q_n$. Необходимые для данного варианта расчетные формулы приведены в табл. 3.

### Асинхронное групповое сосредоточенное возмущение

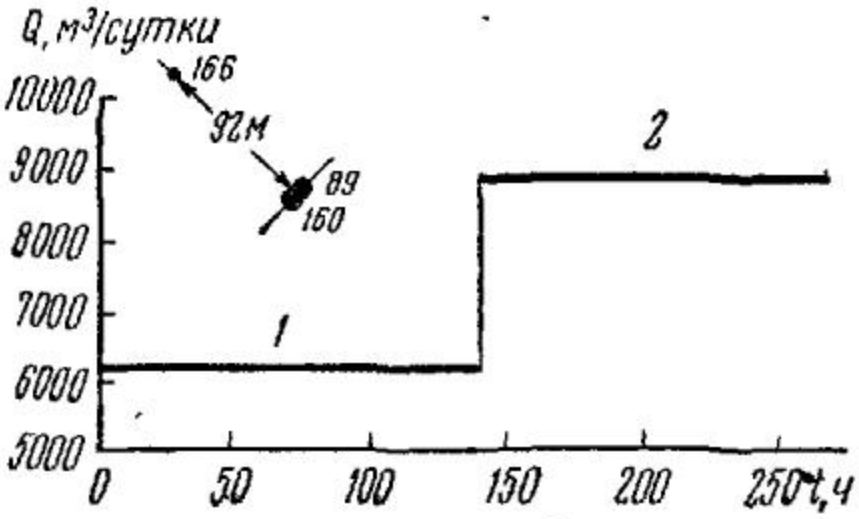
Компактность в расположении нескольких возмущающих скважин позволяет принять условие равенства расстояний от возмущающих до наблюдательных скважин. В качестве расчетного принимается расстояние от наблюдательной до наиболее нагруженной возмущающей скважины; тогда в уравнении (3.1) $\lg r_{пр} \approx \lg r$. Обработка этого варианта совершенно аналогична случаю с одиночным возмущением с той лишь разницей, что в данном случае приведенное время вычисляется в зависимости от ступеней суммарного дебита. Причиной скачкообразного изменения дебита здесь может быть асинхронная работа возмущающих скважин или изменения дебита отдельных скважин вследствие перерывов. В расчет коэффициента водопроводимости принимается суммарный дебит анализируемой ступени возмущения $Q_n$. Формулы для определения параметров помещены в табл. 3.

Таблица 3

| Способ возмущения | Способы обработки: Временное прослеживание | Способы обработки: Площадное прослеживание | Способы обработки: Комбинированное прослеживание | Приведенные величины |
|---|---|---|---|---|
| Одиночное скачкообразное возмущение | $\frac{S}{Q} - \lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $\frac{S}{Q} - 0{,}35 - \lg t_{пр}$ | $\frac{S}{Q} - \lg \frac{A}{C} - 0{,}35$ | $\lg t_{пр} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg (t - t_2) \pm \ldots \pm \pm \Delta Q_{n-1} \lg (t - t_n)}{Q_n}$ |
| Асинхронное групповое сосредоточенное возмущение | $\frac{S}{Q} - \lg t_{пр}$; $km = \frac{0{,}183}{C}$; $\lg a = 2 \lg r - \frac{A}{C} + 0{,}35$ | $\frac{S}{Q} - \lg r$; $km = \frac{0{,}366}{C}$; $\lg a = \frac{2A}{C} - 0{,}35$ | $\frac{S}{Q} - \lg \frac{t_{пр}}{r^2}$; $km = \frac{0{,}183}{C}$; $\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | $\lg t_{пр} = \frac{Q_1 \lg t \pm \Delta Q_1 \lg (t - t_2) \pm \ldots \pm \pm \Delta Q_{n-1} \lg (t - t_n)}{Q_n}$; $\lg r_1 \approx \lg r_2 \approx \lg r_3 \ldots \approx \lg r$ |

На рис. 2 показан пример обработки результатов групповой асинхронной откачки при компактном расположении возмущающих скважин с помощью приведенного времени и понижения. Как видно, получен единый график для обеих ступеней дебита.

Способом площадного прослеживания приведенного понижения можно обрабатывать результаты не только сосредоточенного, но и рассредоточенного возмущения, а также результаты нескольких кустовых опытов, выполненных при различной степени постоянного во времени возмущения на каждом из них. Пример таких графиков показан на рис. 3, на котором обработаны данные по четырем опытным кустам в однородном пласте.



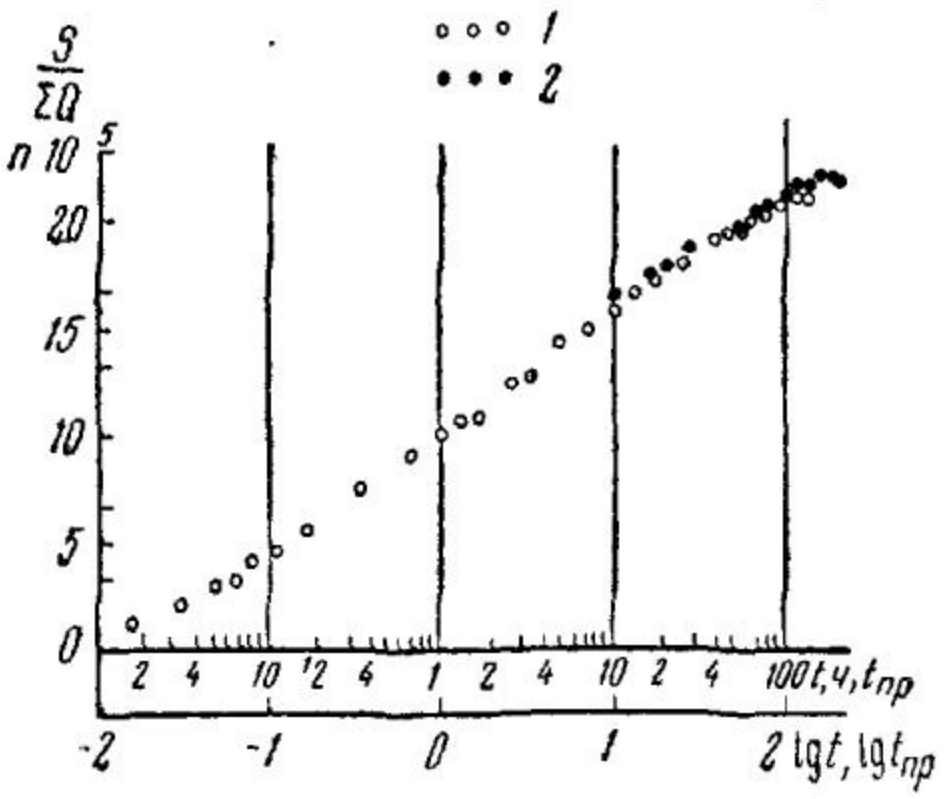




Рис. 2. Временное прослеживание приведенного понижения по скв. 166 при групповой асинхронной откачке.

*1* — возмущающая скв. 160, $Q = 6200$ м³/сутки; *2* — возмущающие скважины 160, 89, $\Sigma Q = 8950$ м³/сутки

Обработкой опытных данных с помощью приведенного времени и понижения, т. е. представлением на одном графике опытной информации, полученной при всех ступенях возмущения в одном пункте или по нескольким кустовым опытам в разных пунктах водоносного горизонта, достигается бóльшая степень свертывания информации и большая наглядность для суждения о степени неоднородности водоносного пласта.

Описанными вариантами ограничиваются наиболее распространенные в практике случаи скачкообразного изменения дебита. Предлагаемые приемы обработки применимы в пределах, определяемых контрольным временем относительно конкретной ступени возмущения, взятой для обработки:

$$t > t_k > \frac{r^2_{max}}{0{,}4a},$$

где $r_{max}$ — расстояние до наиболее удаленной наблюдательной скважины.

Кроме того, этому же условию должны удовлетворять и продолжительности всех предыдущих ступеней: $t_i > t_{ik} > \frac{r^2_{max}}{0{,}4a}$, где $t_i$ —

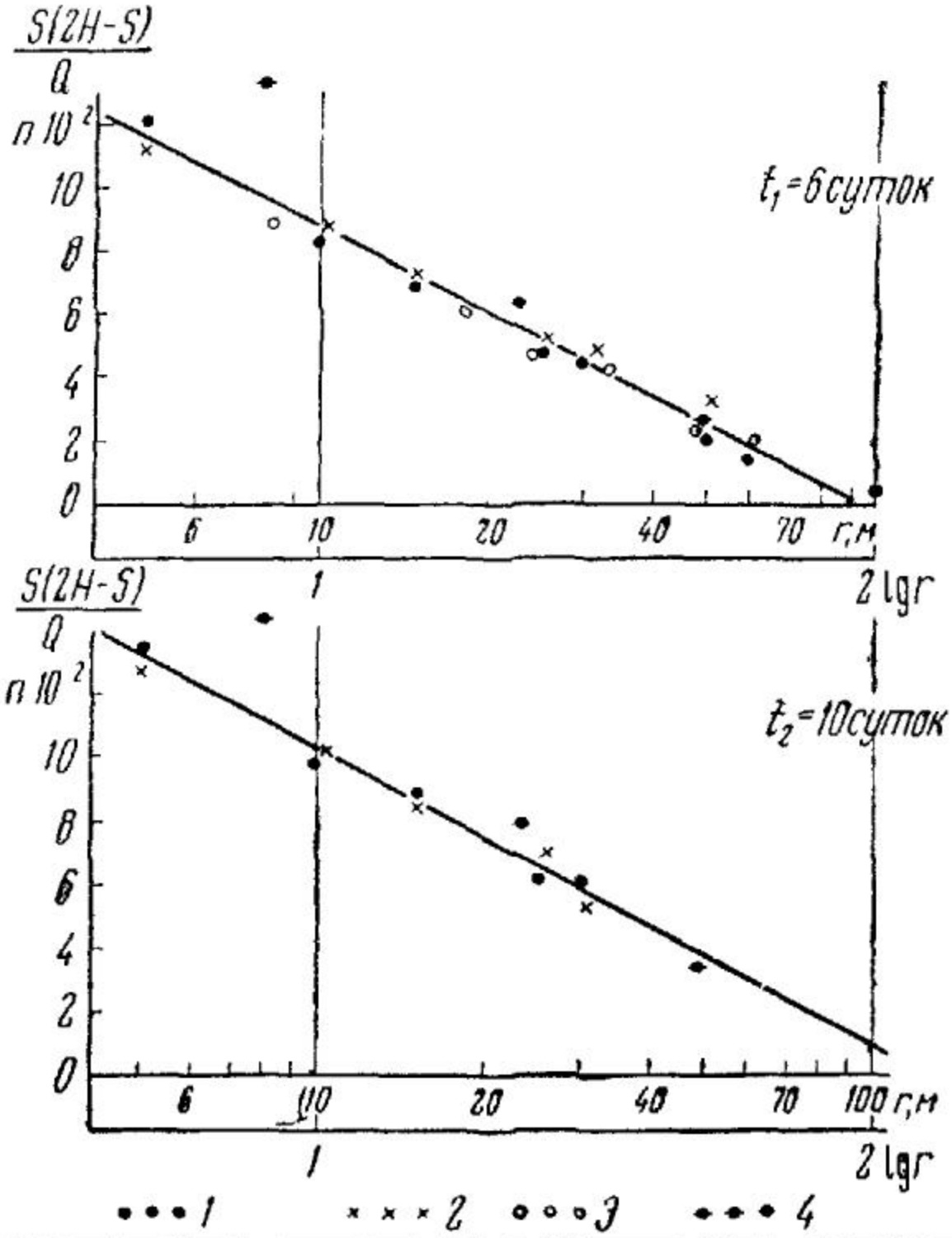



Рис. 3. Площадное прослеживание приведенного понижения по четырем рассредоточенным кустам.
Номера наблюдательных скважин опытных кустов:
1 — 33; 2 — 39; 3 — 61; 4 — 73

| t, сутки | $\frac{S(2H-S)}{Q}$ (1) | $\frac{S(2H-S)}{Q}$ (2) | C | K, м/сутки | A | lg a | a, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | $8{,}8\cdot10^{-2}$ | $-0{,}4\cdot10^{-2}$ | $9{,}2\cdot10^{-2}$ | 7,95 | $18{,}0\cdot10^{-2}$ | 2,782 | $6{,}1\cdot10^{2}$ |
| 10 | $10{,}3\cdot10^{-2}$ | $0{,}8\cdot10^{-2}$ | $9{,}5\cdot10^{-2}$ | 7,7 | $19{,}8\cdot10^{-2}$ | 2,81 | $6{,}5\cdot10^{2}$ |

продолжительность каждой ступени возмущения. При одиночном возмущении контрольное время для всех ступеней возмущения одно и то же.

*Линейный, логарифмический и обратный логарифмический характер возмущения*

Обратный логарифмический характер возмущения имеет место при выпусках, когда временная зависимость дебита в координатах $\frac{1}{Q} - \lg t$ является прямой линией.

Линейный и логарифмический характер возмущения (не частые в практике случаи) бывают обусловлены работой водоподъемников или состоянием фильтров и прискважинной зоны. Временные зависимости дебита в этих случаях представляют собой прямые линии в координатах $Q - t$, $Q - \lg t$.

### Обратный логарифмический характер возмущения (выпуски)

При кустовых выпусках для возмущающих скважин характерно условие постоянства понижения и переменности дебита, для наблюдательных переменными являются и дебит и понижение. По этой причине обработка опытных данных, получаемых в возмущающих и наблюдательных скважинах, производится различными способами:

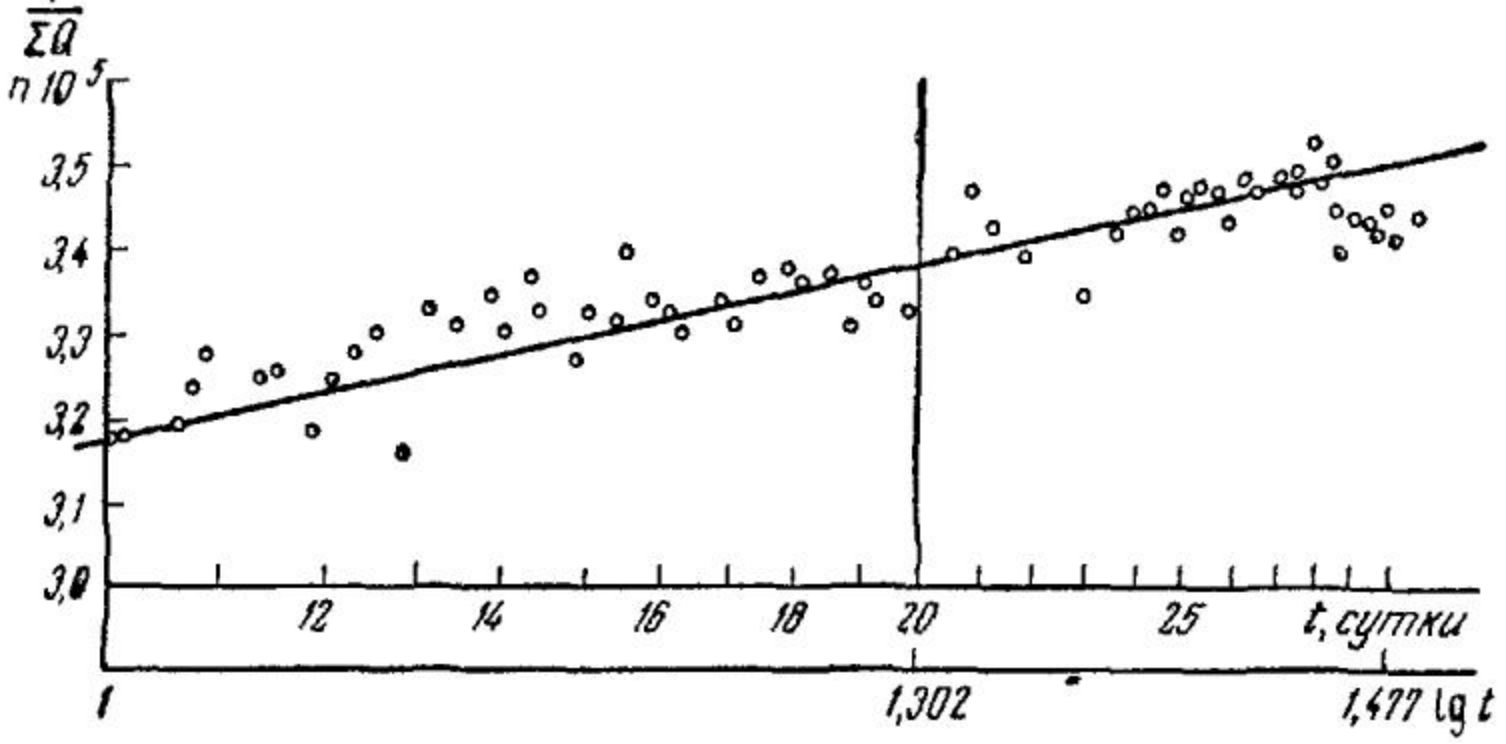



**Рис. 4.** Определение $km$ по графику прослеживания дебита при групповом выпуске из скважин 14, 24, 23.

$S_0 = 52{,}5$ м, $C = 6{,}95 \cdot 10^{-6}$; $km = 502$ м²/сутки.

в первом случае основные расчетные параметры определяются по временной закономерности дебита, во втором — по временным закономерностям приведенного понижения. Далее рассматриваются оба эти способа.

Обработка опытной информации возмущающих скважин при выпуске производится на основе следующей формулы [29]:

$$Q_{(t)} = \frac{km \cdot S_0}{0{,}183 \lg \frac{2{,}25at}{r_0^2}} \quad \text{при} \quad \frac{at}{r_0^2} > 100, \tag{3.2}$$

где $S_0$ — понижение в возмущающей скважине;

$r_0$ — радиус возмущающей скважины.

Записываем эту формулу в виде уравнения прямой:

$$\frac{1}{Q} = A + C \lg t,$$

где $C = \frac{0{,}183}{kmS_0}$ — угловой коэффициент графика $\frac{1}{Q} - \lg t$, откуда $km = \frac{0{,}183}{C \cdot S_0}$.

Поскольку величина $\frac{1}{Q}$ вследствие прискважинных помех оказывается завышенной, получение действительных величин коэффициента пьезопроводности в возмущающих скважинах невозможно. Таким же способом обрабатывают сосредоточенный синхронный групповой выпуск. В последнем случае производится временное прослеживание суммарного дебита системы возмущающих скважин. В остальном обработка производится аналогичным образом. На рис. 4 показан пример расчета этим способом. Коэффициент водопроводимости определен достаточно близким к средней величине ($km_{ср} = 570$ м²/сутки), рассчитанной по наблюдательным скважинам.

Контрольное время для способа временного прослеживания дебита $t_k = \frac{100r^2}{a}$. Предел применимости способа определяется неравенством $t > t_к$. Определение коэффициента водопроводимости в возмущающих скважинах указанным способом не учитывает дополнительного сопротивления в трубах при движении воды от фильтра до излива. Однако величина погрешности за неучет этого сопротивления при глубине фильтров 100—200 м оказывается небольшой.

В каждом конкретном случае величину потерь напора в обсадных трубах можно определять по формуле, рекомендованной в работе [43]:

$$\Delta h = 30{,}9 \frac{Q^{1{,}85} \cdot L}{D^5}, \qquad (3.3)$$

где $\Delta h$ — потери напора в м;
$Q$ — дебит скважины в л/сек;
$L$ — длина обсадной колонны в м;
$D$ — внутренний диаметр труб в см.

Закономерность изменения понижения в наблюдательных скважинах при опробовании водоносных пластов выпусками описывается уравнением, аналогичным уравнению Тейса [29]. Различие заключается в переменности дебита выпуска. По истечении некоторого времени экспоненциальная функция в этом уравнении может быть заменена логарифмической. Следовательно, уравнение понижения в наблюдательных скважинах, как и уравнение Джейкоба, можно записать в виде прямой относительно приведенного понижения $\frac{S}{Q}$ в координатах: $\frac{S}{Q} = A + C \lg t$, $\frac{S}{Q} = A - C \lg r$, $\frac{S}{Q} = A + C \lg \frac{t}{r^2}$. Эта запись делается так же, как для случая откачек с постоянным дебитом. Таким же приемом получаются формулы для расчета основных параметров, но только при выпусках фигурирует приведенное понижение. Таким образом, обработку результатов выпуска в наблюдательных скважинах можно производить способами

временного, площадного и комбинированного прослеживания приведенного понижения на основе графиков: $\frac{S}{Q} - \lg t$, $\frac{S}{Q} - \lg r$, $\frac{S}{Q} - \lg \frac{t}{r^2}$.

Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определяются по угловым коэффициентам и начальным ординатам этих графиков. При групповом синхронном и компактном воэмущении в расчет коэффициента водопроводимости принимается суммарный дебит возмущающих скважин; при групповом рассредоточенном выпуске, кроме того, определяется приведенное расстояние наблюдательных скважин до возмущающих. Последнее вычисляется так же, как и для рассредоточенного синхронного возмущения при откачках. Формулы для определения основных параметров, полученные описанным выше способом, помещены в табл. 4. Пределы применимости этого метода обработки ограничиваются контрольным временем, практически

Таблица 4

| Способ возмущенин | | Способы обработки: Временное прослежнвание | Площадное прослеживание | Комбинированное прослеживание | Примечанне |
|---|---|---|---|---|---|
| Обратный логарифмический характер возмущения | возмущающая скважина | $\frac{1}{Q} - \lg t$<br>$km = \frac{0{,}183}{S_0 : C}$ | — | — | Синхронное групповое возмущение:<br>$Q = Q_{сум}$ |
| | наблюдаемая скважина | $\frac{S}{Q'} - \lg t$; $km = \frac{0{,}183}{C}$; $\lg a = 2 \lg r' - n + \frac{A}{C}$ | $\frac{S}{Q'} - \lg r'$; $km = \frac{0{,}366}{C}$; $\lg a = \frac{2A}{C} - n - \lg t$ | $\frac{S}{Q'} - \lg \frac{t}{r^2}$; $km = \frac{0{,}183}{C}$; $\lg a = \frac{A}{C} - n$ | Синхронное групповое возмущение:<br>$n = 0{,}35$<br>$r' = r_{пр}$<br>$Q' = Q_{сум}$ |
| Линейный и логарифмический характер возмущения | | | | | Линейное изменение *дебита:*<br>$n = -0{,}08$<br>Логарифмическое изменение дебита:<br>$n = -0{,}29$<br>Синхронное групповое возмущение:<br>$r' = r_{пр}$<br>$Q' = Q_{сум}$ |

равным контрольному времени, рекомендованному для случая с постоянным возмущением. Поскольку основное уравнение для понижения при выпуске является приближенным, обработку опытных данных необходимо производить несколькими способами. Признаком достоверности определяемых параметров является их стабильность по способам обработки.

Примеры временны́х, площадных и комбинированных графиков прослеживания приведенного понижения, построенных по результатам группового выпуска, показаны на рис. 14, 17, 21.

### Линейный и логарифмический характер возмущения

Таким характером возмущения аппроксимируются некоторые сложные закономерности понижения, вызванные, как правило, дефектами в работе насосного оборудования или состоянием фильтров и прискважинной зоны. Обработку опытных данных можно производить на основе следующей формулы [29]:

$$S \approx \frac{0{,}183Q\,(t)}{km} \lg \frac{n \cdot at}{r^2} \text{ при } \frac{r^2}{4at} \ll 1. \qquad (3.4)$$

Для линейного изменения дебита $n = 0{,}83$, для логарифмического $n = 0{,}51$.

В отличие от выпуска при данном характере возмущения для возмущающих и наблюдательных скважин имеет место одно условие — переменность дебита и понижения, поэтому способы обработки данных возмущающих и наблюдательных скважин одни и те же; они аналогичны способам обработки результатов выпуска по наблюдательным скважинам, изложенным в предыдущем разделе. Различие заключается в том, что в данном случае в формуле для определения коэффициента пьезопроводности вместо числового коэффициента $+0{,}35$ при выпуске используется коэффициент $-0{,}08$ при линейном и $-0{,}29$ — при логарифмическом изменении дебита.

В практике обработки опытных данных наиболее распространенной ошибкой в описанных случаях является игнорирование факта переменности дебита, когда вместо прослеживания приведенного понижения ограничиваются прослеживанием понижения, т. е. обработка производится методом Джейкоба; в расчетах коэффициента водопроводимости используется конечный дебит откачки или выпуска. Результатом является погрешность в сторону завышения коэффициента водопроводимости. Величина ошибки зависит от степени изменения дебита, продолжительности возмущения и удаленности наблюдательных скважин от возмущающих. Ошибка за счет игнорирования переменности дебита возникает при способах временно́го прослеживания. На рис. 5 показаны графики зависимости ошибки в определении коэффициента водопроводимости от указанных факторов. Как видно, ошибка в определении коэффициента водопроводимости возрастает с увеличением степени изменения дебита, с уменьшением

длительности выпуска и с приближением наблюдательных скважин к возмущающим, достигая 50%.

Игнорирование переменности дебита при выпусках является причиной положительной аномалии временных графиков прослеживания, что иллюстрируется примером на рис. 6. Как видно, на графиках $S - \lg t$ появляется второй, более пологий участок, которого нет на графиках $\frac{S}{Q} - \lg t$.

Рис. 5. Характер ошибки временного прослеживания при игнорировании изменения дебита выпуска

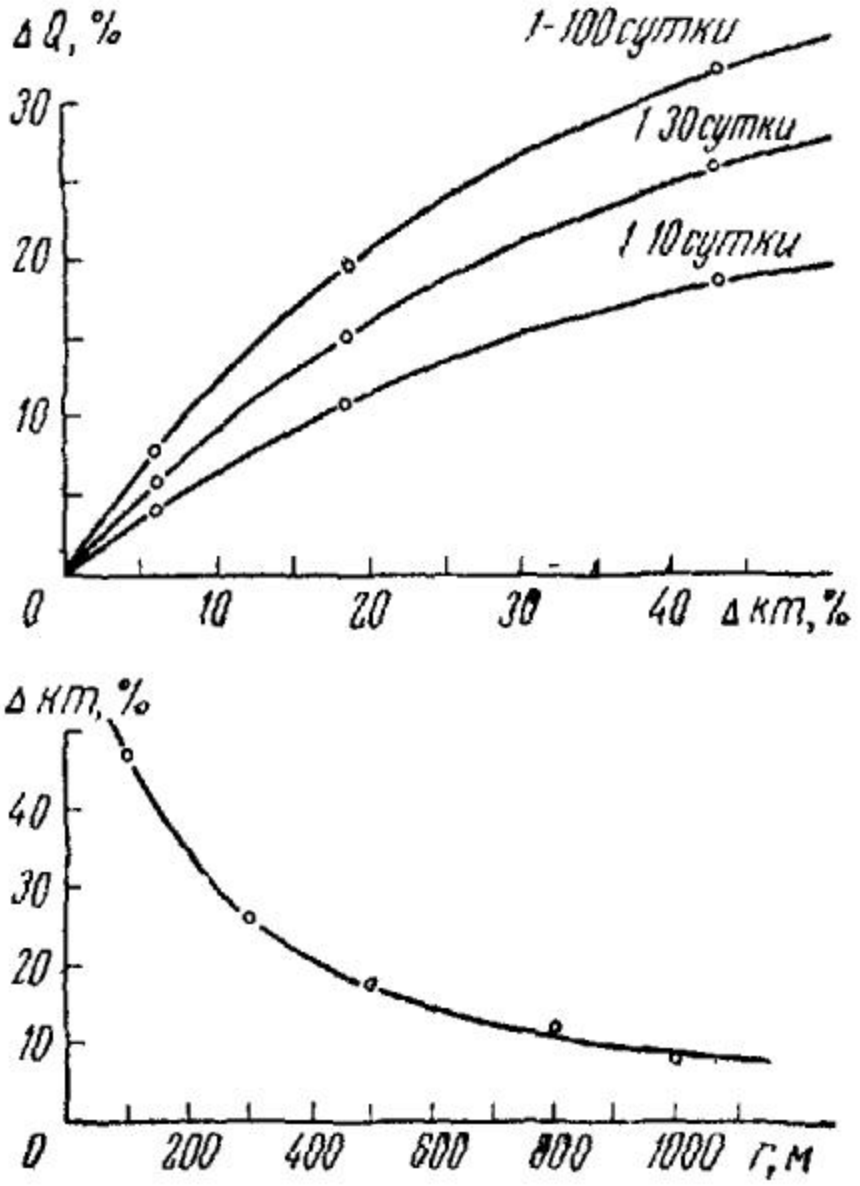
| $r$ | $S_1$ | $S_k$ | $C$ | $km'$ | $\Delta km$, % |
|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 1,94 | 2,38 | 0,44 | 740 | 47 |
| 300 | 1,24 | 1,76 | 0,52 | 627 | 26 |
| 500 | 0,92 | 1,47 | 0,55 | 592 | 18 |

$$\Delta km = \frac{km^1 - km}{km} \cdot 100\%;$$

$$S_{1,к} = \frac{0{,}183 \cdot Q_{1,к}}{km} \cdot \lg \frac{2{,}25at}{r^2};$$

$$\Delta Q = \frac{Q_1 - Q_к}{Q_1} \cdot 100\%$$

$km = 500$ м²/сутки; $Q_1 = 2000$ м³/сутки;
$t_1 = 1$ сутки; $a = 2 \cdot 10^6$ м²/сутки;
$Q_к = 1780$ м³/сутки; $t_к = 10$ суток




Кроме указанных видов изменения дебита, могут иметь место и более сложные, представляющие собой сочетания скачкообразного, линейного или параболического характера изменений. С таким характером возмущения приходится иметь дело при анализе опыта эксплуатации водозаборов или водоотлива. В этих случаях обработка указанными приемами может оказаться весьма сложной. Значительное упрощение обработки возможно при сложном возмущении, после которого длительное время сохраняется *постоянный дебит*. Тогда применяется прием определения расчетного начала опыта, которым заменяется его фактическое начало. Обоснование этого приема дано в работе [132]. При этом предполагается, что при $t > 1{,}5t_0$ (где $t$ — текущее время опыта, $t_0$ — продолжительность периода с переменным дебитом) опыт производится с постоянным (конечным) дебитом, а возмущение начинается через время $t'$ после фактического начала откачки. Этот прием основан на том, что через период $0{,}5t_0$ после стабилизации дебита *понижение уровня почти не зависит от характера возмущения*, а определяется в основном общим количеством *откачанной воды*. *Величина* $t'$ *вычисляется* по формуле:

$$t' = \frac{W}{Q_0},$$

где $W$ — общее количество откачанной воды за период $t_0$; $Q_0$ — постоянный дебит, установившийся после периода его сложных изменений.

Обработка с использованием этого приема производится, как для опыта с постоянным дебитом $Q_0$. Отсчет времени ведется от расчетного начала опыта, т. е. для каждого замера расчетное время равно $t_р = t - t'$, где $t$ — текущее время опыта от его фактического начала.

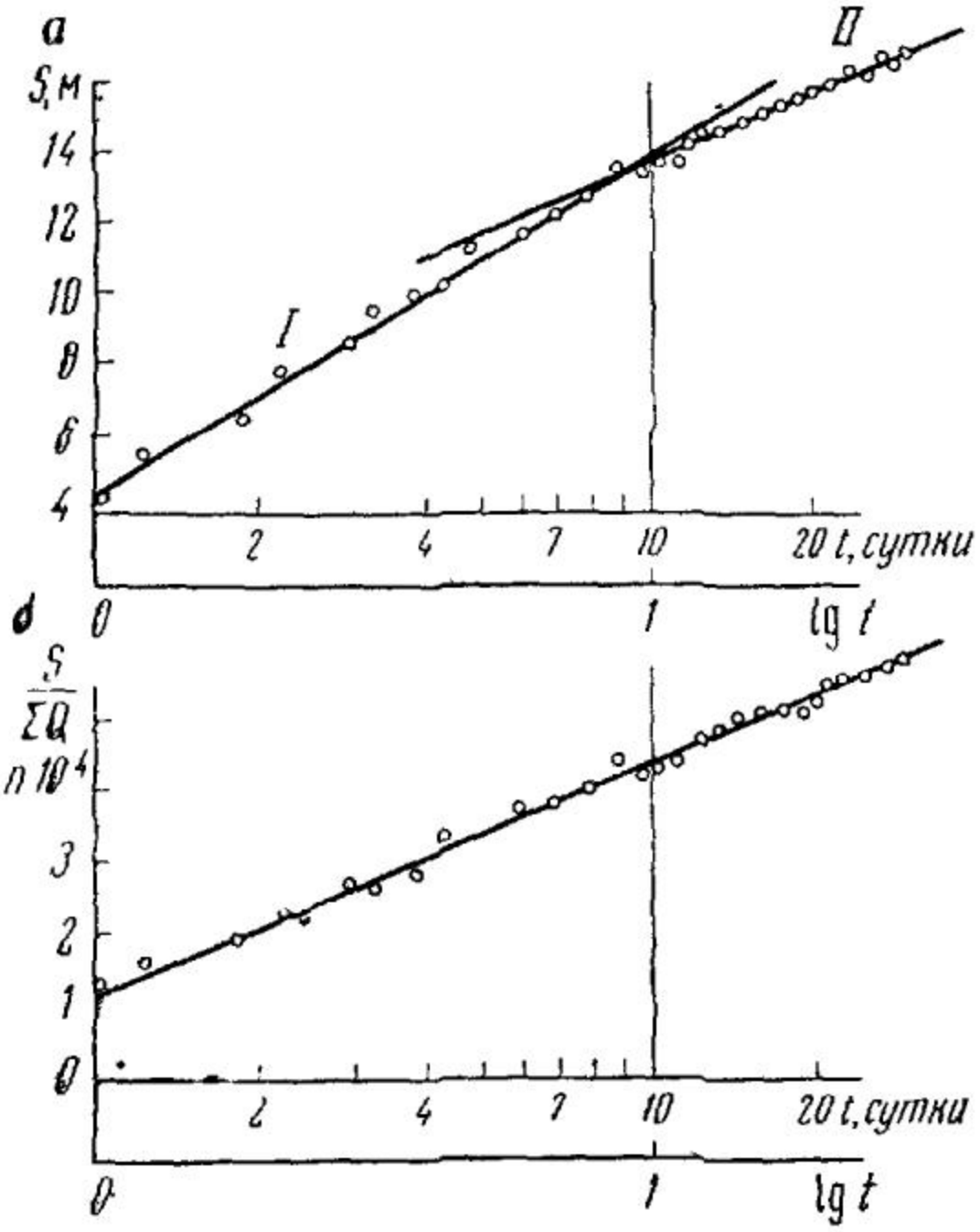



*Рис. 6. Временные графики понижения (а) и приведенного понижения (б) при выпуске с $Q$ = = 28 968 м³/сутки по наблюдательной скв. 25.*

| Способ обработки | № участков графика | C | $km$, м²/сутки | A | $a$ м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|
| $S - \lg t$ | I | 9,6 | 552 | 4,2 | $2{,}9 \cdot 10^6$ |
| | II | 6,8 | 780 | 7,0 | $1{,}1 \cdot 10^7$ |
| $\frac{S}{\Sigma Q} - \lg t$ | | $3{,}34 \cdot 10^{-4}$ | 548 | $1{,}11 \cdot 10^{-4}$ | $2{,}3 \cdot 10^6$ |

## 3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПРИ СЛОЖНОМ ХАРАКТЕРЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА СТАДИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УРОВНЯ

Прекращение откачки или выпуска является возмущением, которое можно рассматривать как самостоятельный опыт или самостоятельную стадию одного опыта. Обработка этой второй стадии отличается некоторой спецификой по сравнению с обработкой первой стадии — стадии понижения. Это прежде всего относится к необходимости учета «наследства» первой стадии опыта, которое по суще-

ству заключается в нахождении правильного уровня отсчета повышений. Полезным свойством информации, получаемой на стадии восстановления уровня, является ее меньшая по сравнению со стадией понижения зависимость от нерегулярных изменений дебита. Излагаемые далее приемы обработки данных восстановления уровня игнорируют эффект заполнения емкости скважины ввиду незначительной величины погрешностей, связанных с этим явлением. Необходимый анализ его содержится в работе [137] *.

### Прослеживание восстановления после возмущения с постоянным дебитом

Обработка этого наиболее простого варианта основывается на следующем уравнении [164]:

$$S = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{T+t}{t}, \qquad (3.5)$$

где $T$ — продолжительность откачки или выпуска;

$t$ — продолжительность восстановления.

Формула получена по принципу суперпозиции. Остаточное понижение $S$ рассматривается как результат одновременного действия продолжающейся откачки $S = f\,[\lg(T+t)]$ и нагнетания $S = f(\lg t)$ с момента реальной остановки откачки, при равенстве ее дебита дебиту нагнетания.

Обработка восстановления уровня производится на основе этой же формулы. Она заключается в построении временного графика прослеживания восстановления в координатах $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$ ($S^*$ — повышение уровня). При временном прослеживании удобнее использовать обратную величину сложного времени $\frac{t}{T+t}$ для того, чтобы иметь график привычного вида, т. е. иметь возрастание $S^*$ с возрастанием сложного времени. Ординатой служит повышение уровня, т. е. разность между динамическим уровнем в данный момент восстановления и динамическим уровнем в конце откачки. Формула (3.5) дает возможность определить только коэффициент водопроводимости: $km = \frac{0{,}183Q}{C}$, где $C$ — угловой коэффициент графика прослеживания в координатах $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$. Путем дополнительных несложных преобразований можно получить формулу для определения коэффициента пьезопроводности [106]:

$$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{S_{max}}{C} - \lg T,$$

где $S_{max}$ — максимальное понижение или максимальное восстановление уровня;

$C$ — угловой коэффициент графика $S - \lg \frac{t}{T+t}$.

---

* Эффект заполнения емкости скважины следует учитывать лишь при малых величинах коэффициента водопроводимости.

Известно [143], что при условии $t \leqslant 0{,}1T$ влиянием «наследства» откачки можно пренебречь и восстановление уровня описывается уравнением (1.1). Тогда обработка данных восстановления производится точно так же, как и для понижения, т. е. способами временного (по графику $S^* - \lg t$), площадного ($S^* - \lg r$) и комбинированного $\left(\text{по графику } S^* - \lg \frac{t}{r^2}\right)$ прослеживания.

Наличие временного критерия на практике вызывает стремление пользоваться более простой методикой обработки, поскольку в любом случае имеется диапазон времени, удовлетворяющий этому критерию. Однако таким упрощенным приемом не следует пользоваться

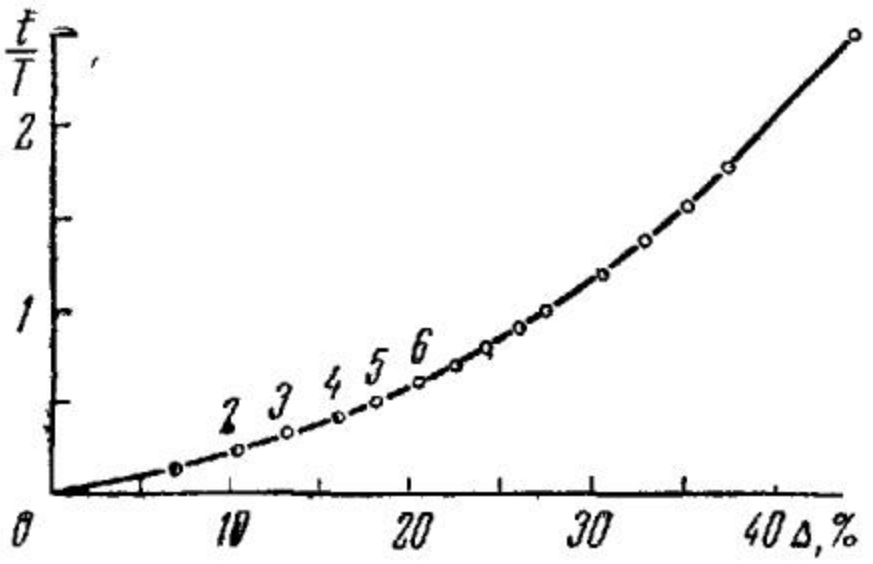



Рис. 7. Характер ошибки $\Delta km$ при игнорировании наследства откачки: При $t_1 = 5$, $km = 100$, $\frac{Q}{km^*} = 10$, в точках 2, 3, 4, 5, 6 $\frac{Q}{km^*} = 6$; 4,3; 3; 3,5; 2,7. $km^*$ — коэффициент водопроводимости, определяемый по восстановлению уровня

$$\Delta km = \frac{km_t^* - km_{\frac{T+t}{t}}^*}{km_{\frac{T+t}{t}}^*}$$

| $\frac{t_к}{T}$ | $t_к$ | $S^* = \frac{0{,}183Q}{km} \lg \frac{T+t}{t}$ | | $C$ | $km_t^*$ | Δ, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $S_1^*$ | $S_2^*$ | | | |
| 0,1 | 10 | 2,42 | 1,905 | 1,71 | 107 | 7 |
| 0,2 | 20 | 1,451 | 0,85 | 0,993 | 110,5 | 10,5 |
| 0,3 | 30 | 1,05 | 0,505 | 0,7 | 113,2 | 13,2 |

в тех случаях, когда это связано с потерей некоторой части опытной информации.

Пределы применимости способов прослеживания восстановления определяются контрольным временем. Должно выполняться условие:

$$T \geqslant t_k = \frac{r^2}{0{,}4a} \text{ и } t > t_к.$$

Игнорирование «наследства» первой стадии возмущения при обработке данных восстановления уровня способом временного прослеживания приводит к ошибке, величина которой зависит от отношения $\frac{t}{T}$, что иллюстрируется рис. 7. Как видно из рисунка, при $\frac{t}{T} = 2{,}5$ ошибка достигает 45% в сторону завышения коэффициента водопроводимости. Игнорирование наследства откачки (выпуска) при площадном прослеживании, т. е. выбор моментов времени за пределами временного ограничения ($t > 0{,}1T$), приводит к менее

ощутимым погрешностям. Следствием превышения этого временного ограничения является дополнительное рассеяние точек. Расчетные формулы помещены в табл. 5.

Таблица 5

| Время восстановления | Способы обработки | | |
|---|---|---|---|
| | Временное прослеживание | Площадное прослеживание | Комбинированное прослеживание |
| $t \geqslant 0{,}1T$ | $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$<br>$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{S_{max}}{C} - \lg T$<br>$km = \frac{0{,}183Q}{C}$ | — | — |
| $t \leqslant 0{,}1T$ | $S^* - \lg t$<br>$\lg a = 2\lg r - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $S^* - \lg r$<br>$km = \frac{0{,}366Q}{C}$<br>$\lg = \frac{2A}{C} - 0{,}35 - \lg t$ | $S^* - \lg \frac{t}{r^2}$<br>$km = \frac{0{,}183Q}{C}$<br>$\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35$ |

*Определение коэффициента водопроводимости (фильтрации) в возмущающих скважинах*

Эта задача связана с учетом несовершенства по степени и по характеру вскрытия водоносного пласта. При расчетах по формулам для установившегося режима фильтрации [30] учет несовершенства достигается выделением соответствующих коэффициентов, учитывающих степень несовершенства и положение фильтра относительно границ пласта в разрезе. Получение всех необходимых коэффициентов в реальных условиях — задача достаточно сложная.

Обработка способом временного прослеживания основывается на известном [143] положении о том, что через некоторое время после начала возмущения опытная закономерность изменения уровня перестает испытывать влияние несовершенства, но это влияние отражается на абсолютных величинах понижения. Следовательно, пользуясь той частью графика прослеживания, угловой коэффициент которого определяется только степенью возмущения и коэффициентом водопроводимости (фильтрации), находят последний по угловому коэффициенту. Определение коэффициента пьезопроводности по временному прослеживанию невозможно, так как из-за скин-эффекта и других сопротивлений происходит смещение графика по ординате. Расчеты показывают, что по данным откачек из

одиночных скважин ошибки в величинах пьезопроводности достигают нескольких порядков.

Для определения коэффициента водопроводимости (фильтрации) в основном пользуются информацией стадии восстановления, поскольку в этом случае незакономерные изменения дебита около постоянного среднего на стадии понижения уже не имеют значения и не дают рассеяния точек на временных графиках восстановления. Обработку данных восстановления производят так, как это описано в предыдущем разделе. В отличие от обработки данных наблюдательных скважин обработка данных возмущающих скважин сопряжена с необходимостью диагностирования представительного участка, где влияние несовершенства практически не ощутимо. Этот участок появляется достаточно быстро, через промежуток времени, соизмеримый с практикуемой продолжительностью откачек, однако сама вероятность появления такого участка и время его появления — факторы практически нерегулируемые, а во многих случаях и недиагностируемые. Практически при обработке возмущающих скважин способом временно́го прослеживания мы очень часто принимаем за представительный участок, предшествующий таковому. Согласно работе [127], понижение в возмущающей скважине в начальный период возмущения есть экспоненциальная (либо логарифмическая) функция времени, пропорциональная величине $kl$, где $l$ — длина фильтра. Следовательно, использование этой или промежуточной части опытной закономерности понижения в однородных водоносных пластах при несовершенных возмущающих скважинах дает, как правило, ошибку в сторону занижения коэффициента водопроводимости, так как обычно $kl < km$. Влияние несовершенства по степени вскрытия усиливается эффектом несовершенства по характеру вскрытия, кольматацией прискважинной зоны, анизотропией пласта.

В интенсивно трещиноватых и закарстованных породах может быть обратный эффект из-за «сверхсовершенства» по характеру вскрытия, так как эффективный радиус скважины оказывается существенно больше фактического.

### Прослеживание восстановления после скачкообразного возмущения

В формулу для восстановления уровня (3.5) входит продолжительность опыта на стадии понижения ($T$), следовательно, способы обработки восстановления небезразличны к характеру возмущения. Необходимость учета «наследства» откачки (выпуска) требует и учета «наследства» характера возмущения. При этом, как и при обработке понижения, имеет значение компактность или рассредоточенность возмущения.

*Восстановление уровня после скачкообразного рассредоточенного возмущения*

В данном случае имеется в виду восстановление уровня после групповой откачки из возмущающих скважин, удаленных друг от друга на расстояния, соизмеримые с расстояниями от них до наблюдательных скважин. В практике опытно-фильтрационных работ наиболее частыми являются случаи восстановления после асинхронного и синхронного группового возмущения.

## Восстановление после группового асинхронного возмущения

При длительных групповых откачках разновременное включение возмущающих скважин не оказывает существенного влияния на результаты восстановления уровня. Например, при равенстве продолжительностей начальной и последующей ступени возмущения переменностью дебита можно пренебречь. Поэтому излагаемый ниже способ обработки чаще всего используется при прослеживании восстановления после разновременного отключения возмущающих скважин.

Обработка данных восстановления после группового скачкообразного асинхронного возмущения способом временно́го прослеживания основана на формуле [106]:

$$S^* = \frac{0{,}183 Q_n}{km} \cdot \lg \frac{(T_i + t_i)_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}}. \qquad (3.6)$$

Формула получена путем суммирования и элементарных преобразований гидравлических сопротивлений от единичных асинхронных возмущений. Величины, входящие в формулу, имеют следующий смысл: $Q_n$ — дебит последней ступени возмущения;

$$\lg (T_i + t_i)_{\text{пр}} = \frac{Q_1 \lg (T_1 + t_1) \pm \Delta Q_1 \lg (T_2 + t_2) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg (T_n + t_n)}{Q_n}$$

$$\lg t_{\text{пр}} = \frac{Q_1^* \lg t_1 + \Delta Q_1^* \lg t_2 + \ldots + \Delta Q_{n-1}^* \lg t_n}{Q_n},$$

где $\Delta Q_1, \ldots, \Delta Q_n$ — соответствующие изменения суммарного дебита;

$t_1, t_2, \ldots, t_n$ — текущее время восстановления уровня после каждой ступени возмущения;

$T_1, T_2, \ldots, T_n$ — продолжительность отдельных ступеней возмущения;

$\Delta Q_1^*, \ldots, \Delta Q_n^*$ — соответствующие изменения суммарного дебита при разновременном прекращении откачки.

Таблица 6

| Способ возмущения | Способы обработки: Временное прослеживание, $t \geqslant 0{,}1T_{пр}$ | Способы обработки: Временное прослеживание, $t \leqslant 0{,}1T$ | Способы обработки: Площадное прослеживание, $t < 0{,}1T$ | Способы обработки: Комбинированное прослеживание, $t < 0{,}1T$ | Приведенные величины |
|---|---|---|---|---|---|
| Восстановление после группового асинхронного возмущения | $S^* - \lg \frac{t_{пр}}{(T_i + t_i)^1_{пр}}$; $\lg a = 2\lg r_{пр} - 0{,}35 + \frac{S_{max}}{C} - \lg T_{пр}$; $km = \frac{0{,}183Q_n}{C}$; $\lg a = 2\lg r_{пр} - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $S^* - \lg t$; $km = \frac{0{,}183Q_n}{C}$; $\lg a = 2\lg r_{пр} - 0{,}35 + \frac{2A}{C} - \lg t$ | $S^* - \lg r_{пр}$; $km = \frac{0{,}366Q_n}{C}$; $\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | $S^* - \lg \frac{t}{r^2_{пр}}$; $km = \frac{0{,}183Q_n}{C}$; $\lg a = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | $\lg r_{пр} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n}$<br>$\lg T_{пр} = \frac{Q_1 \lg T_1 \pm \Delta Q_1 \lg T_2 \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg T_n}{Q_n}$<br>$\lg (T_i + t_i)_{пр} = \frac{Q_1 \lg (T_1 + t_1) \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg (T_n + t_n)}{Q_n}$<br>$\lg t_{пр} = \frac{Q^*_1 \lg t + \Delta Q^*_1 \lg t_2 + \ldots + \Delta Q^*_{n-1} \lg t_n}{Q_n}$ |
| Восстановление после группового синхронного возмущения | | | | | $(T_i + t_i)^1_{пр} = (T + t)$<br>$t_{пр} = t$<br>$\lg r_{пр} = \frac{Q_1 \lg r_1 \pm Q_2 \lg r_2 \pm \ldots \pm Q_n \lg r_n}{Q_n}$ |
| Восстановление после сосредоточенного скачкообразного возмущения | | | | | $r_{пр} = r$, $t_{пр} = t$<br>$\lg T_{пр}$ и $\lg (T_i + t)_{пр}$ определяются так же, как в первом случае |

Формула (3.6) может быть записана в виде уравнения прямой в координатах $S^* - \lg \frac{t_{пр}}{(T_i + t_i)_{пр}}$, тогда коэффициент водопроводимости определяется угловым коэффициентом этой прямой:

$$km = \frac{0{,}183 Q_n}{C},$$

где $C$ — угловой коэффициент временного графика прослеживания

$$S^* - \lg \frac{t_{пр}}{(T_i + t_i)_{пр}}.$$

Формула для расчета коэффициента пьезопроводности может быть получена из выражения для максимального понижения [106]:

$$\lg a = 2 \lg r_{пр} - 0{,}35 + \frac{S_{max}}{C} - \lg T_{пр}.$$

$T_{пр}$ — приведенное время откачки;

$$\lg T_{пр} = \frac{Q_1 \lg T_1 \pm \Delta Q_1 \lg T_2 \pm \ldots \pm \Delta Q_{n-1} \lg T_n}{Q_n}.$$

$r_{пр}$ — приведенное расстояние до интересующей наблюдательной скважины от возмущающих определяется по дебитам последней ступени возмущения (см. табл. 2).

Восстановление после группового синхронного возмущения (одновременное включение и выключение скважин)

Поскольку $T_1 = T_2 = \ldots = T_n = T$, то в формуле (3.6) $(T_i + t_i)_{пр} = T + t$ и $t_{пр} = t$. Следовательно, обработка способом временного прослеживания производится на основе временного графика $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$, т. е. как и для случая с постоянным дебитом, но в отличие от него, в формуле для коэффициента пьезопроводности $r = r_{пр}$.

Частным случаем группового синхронного возмущения является разновременное включение и одновременное отключение скважин.

При разновременном включении и одновременном отключении возмущающих скважин $t_{пр} = t$ и обработка производится на основе временного графика

$$S^* - \lg \frac{t}{(T_i + t)_{пр}}.$$

Если же продолжительность последней ступени возмущения $T_n$ равна или больше продолжительности предыдущих ступеней $T_n \geqslant \geqslant T_1 + \ldots + T_{n-1}$, обработку можно существенно упростить заменив $(T_i + t)_{пр} = T_{пр} + t$ и $t_{пр} = t$.

Тогда временное прослеживание производится на основе графика

$$S^* - \lg \frac{t}{T_{\text{пр}} + t}.$$

Формулы для определения основных параметров прослеживанием восстановления после группового рассредоточенного возмущения помещены в табл. 6.

*Восстановление после сосредоточенного скачкообразного возмущения*

В данном разделе предполагаются случаи восстановления после одиночного и группового возмущения с одновременным отключением и с сосредоточенным расположением возмущающих скважин, когда можно с погрешностью в определении $a$ порядка до 30% допустить условие равенства логарифмов расстояний от возмущающих до первой наблюдательной скважины. Тогда обработка производится на основе формулы (3.6) способом временного прослеживания при $\lg r_1 \approx \lg r_2 \ldots \approx \lg r$, где $r$ — расстояние от наблюдательной до наиболее нагруженной возмущающей скважины. Обработка производится с помощью временного графика прослеживания в координатах $S^* - \lg \frac{t}{(T_l + t)_{\text{пр}}}$. Необходимые расчетные формулы для определения основных параметров приведены в табл. 6.

Все случаи восстановления после скачкообразного возмущения можно обрабатывать способом площадного прослеживания с известным ограничением. Это ограничение связано с выбором моментов времени для построения графиков прослеживания.

При $t \leqslant 0{,}1T$ $(T_{\text{пр}})$ обработка производится так же, как и при площадном прослеживании понижения, т. е. с использованием графика $S^* - \lg r$. Параметры рассчитываются по формулам в табл. 6.

Площадное прослеживание возможно и при $t \geqslant 0{,}1T$ $(T_{\text{пр}})$, но слишком большое превышение этого критерия нежелательно, это приводит к рассеянию точек на графике, возрастает вероятность ошибки первичной обработки. Критерием возможности обработки опытной информации способом площадного прослеживания восстановления будет линейность и параллельность площадных графиков, построенных на 2—3 момента времени. Комбинированное прослеживание восстановления ограничивается случаем, контролируемым критерием $t \leqslant 0{,}1T$, где $t$ — период времени восстановления, используемый для построения графика. Пределы применимости приемов обработки восстановления после скачкообразного возмущения определяются контрольным временем. Должны выполняться условия:

$$T_l > t_{\text{к}} = \frac{r^2}{0{,}4a} \text{ и } t > t_{\text{к}},$$

где $T_i$ — продолжительность каждой ступени изменения дебита;
$t$ — текущее время восстановления после каждой ступени возмущения.

## Прослеживание восстановления уровня после выпусков

В настоящее время отсутствуют теоретически обоснованные способы обработки восстановления после выпусков, которые давали бы возможность учета «наследства» обратного логарифмического характера возмущения, что имеет место при выпусках. На практике обычно игнорируют факт сложного возмущения и определяют параметры прослеживанием восстановления по сложному времени на основе графика $S^* - lg\frac{t}{T+t}$. В расчете коэффициента водопроводимости используется конечный дебит выпуска. Неучет переменности дебита дает занижение коэффициента водопроводимости. Это видно на рис. 8. При значительной степени изменения дебита $\left(\frac{Q_к}{Q_н} = 0{,}44\right)$ величина коэффициента водопроводимости, определенная после достаточно длительного выпуска ($T = 94$ сутки), оказалась заниженной на 38%, и только после еще более длительного выпуска ($T = 760$ суток) получен результат, совпадающий с величиной, рассчитанной способом прослеживания изменения дебита.

Степень изменения дебита при выпуске, выражаемая угловым коэффициентом графика $\frac{1}{Q} - \lg t$, обратно пропорциональна коэффициенту водопроводимости. Следовательно, игнорирование изменения дебита при определении коэффициента водопроводимости по восстановлению после выпусков будет иметь результатом большие ошибки при опробовании менее водопроницаемых водоносных пластов. Наоборот, при опробовании хорошо проницаемых водоносных пластов в определенных условиях эти ошибки могут быть пренебрежимо малыми. Попытаемся определить пределы применимости обычных способов обработки восстановления уровня применительно к выпускам. При этом в качестве критериев принимается отношение дебитов в начале и в конце выпуска $\frac{Q_к}{Q_н}$ и продолжительность выпуска. Для указанной цели обратимся к примерам четырех разведанных участков, водоносные пласты в пределах которых опробованы выпусками. Необходимые исходные данные и результаты обработки приведены в табл. 7. Ошибка вычислялась по отношению к данным, полученным по прослеживанию понижения уровня.

Результаты анализа конкретных объектов обнаруживают следующие особенности, возникающие при обработке выпусков. При отношении конечного дебита к начальному $\frac{Q_к}{Q_н} = 0{,}9$ (Майлысай и Розенталь), независимо от длительности выпусков обработка восстановления обычными способами позволяет определять действительные параметры практически точно. При отношении $\frac{Q_к}{Q_н} = 0{,}67$ (Бешбулак) расхождения по временному прослеживанию не превышают допустимых пределов (ошибки первичной обработки) при достаточно продолжительном выпуске. При отношении $\frac{Q_к}{Q_н} = 0{,}44$ (Джанубский)

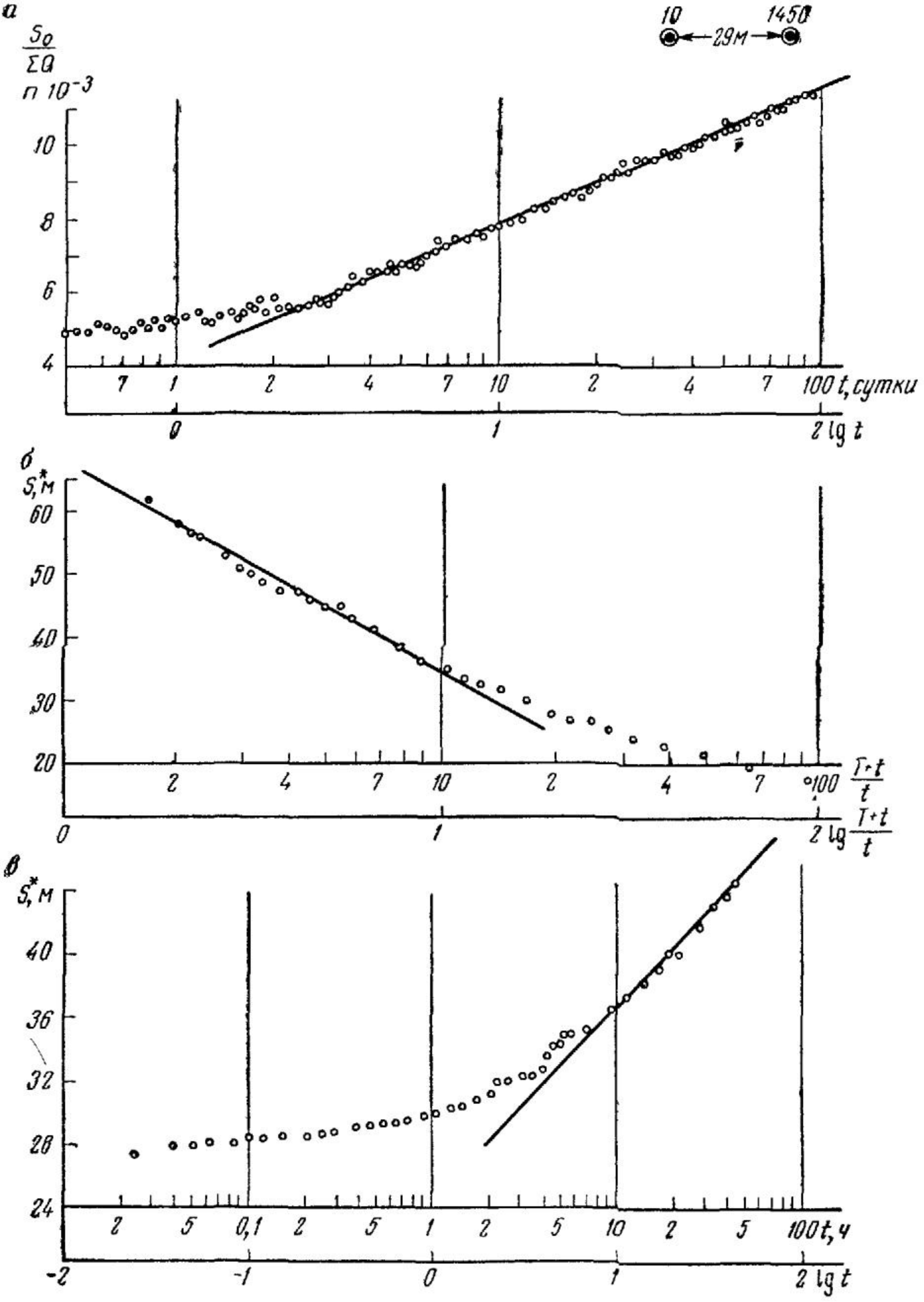



Рис. 8. Прослеживание приведенного понижения и восстановления уровня:

*а* — при выпуске из скв. 10 и 1450 $S_0 = 64$ м, $T = 94$ суток, $\frac{Q_м}{Q_м} = 0{,}44$, по скв. 10 $km = 48{,}2$ м²/сутки, *б* — восстановление после выпуска из скв. 10 и 1450, по скв 10 $km = 30{,}4$ м²/сутки, *в* — восстановление после выпуска из скв 1450 при $T = 760$ суток $km = 46$ м²/сутки

Таблица 7

| Участок | № возмущающей скважины | Конечный дебит, $Q_к$, м³/сутки | $\frac{Q_к}{Q_н}$ | Длительность выпуска $T$, сутки | $km$ по способам обработки, м²/сутки | | | | Δ$km$ по времени, % | Δ$km$ по площади, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $\frac{S}{Q} - \lg t$ | $\frac{S}{Q} - \lg r$ | $S^* - \lg \frac{t}{T+t}$ | $S^* - \lg r$ | | |
| Джанубский | 10,1450 | 5600 | 0,44 | 94 | 48 | — | 30 | — | 38 | — |
| » | 1450 | 3280 | — | 760 | — | — | 45 | — | 0,6 | — |
| Бешбулак | 14 | 29 000 | | | | | | | | |
| » | 23 | | 0,67 | 31 | 580 | 500 | 480 | 500 | 17 | 0 |
| » | 24 | | | | | | | | | |
| Майлысай | 54 | | | | | | | | | |
| » | 55 | 13 200 | 0,91 | 15 | 1000 | 1190 | 1000 | 1195 | 0 | 0 |
| Розенталь | 42 | 1620 | 0,9 | 2,7 | 110 | — | 110 | 115 | 0 | 0,4 |

расхождения между коэффициентами водопроводимости, рассчитанными по временному прослеживанию понижения и восстановления, остаются значительными даже при длительных выпусках, исчезая при продолжительности выпуска, превышающей практикуемую длительность опытов (760 суток).

До сих пор мы рассматривали выпуски, при которых имеет место обратно логарифмический закон изменения дебита. Имеющиеся в нашем распоряжении примеры линейного изменения дебита малопригодны для аналогичного рассмотрения из-за достаточно высокого отношения $\frac{Q_к}{Q_н}$. Но некоторые выводы, которые удается сделать, анализируя выпуски, можно распространить и на случаи линейного и параболического изменения дебита.

Таким образом, рассмотрение закономерностей восстановления после выпусков обнаруживает известную специфику, ограничивающую применение способов обработки, разработанных для восстановления после опытов с постоянным возмущением. При интерпретации опытных данных полезно придерживаться следующих соображений.

1. При отношении $\frac{Q_к}{Q_н} > 0{,}8$, независимо от характера изменения дебита (линейный, параболический, обратный логарифмический) и длительности опыта, обработку восстановления с достаточной для практики точностью можно производить обычными способами площадного и временного прослеживания.

2. При отношении $\frac{Q_к}{Q_н} = 0{,}8—0{,}6$ обработку восстановления после выпусков можно производить при длительных выпусках (1—2 месяца). Расхождения в величинах коэффициента водопроводимости при этих условиях не превышают ошибок первичной обработки.

3. При отношении $\frac{Q_к}{Q_н} < 0{,}6$ при практикуемой продолжительности опытных выпусков (1—2 месяца) обработка восстановления после выпусков обычными способами приводит к существенным погрешностям, в сторону занижения при временно̀м и завышения при площадном прослеживании.

4. Поскольку отсутствуют теоретически обоснованные приемы обработки информации о восстановлении после линейного, параболического и обратного логарифмического возмущения, при наличии расхождений следует отдавать предпочтение параметрам, определяемым способами прослеживания понижения.

Эти способы необходимо рассматривать в качестве основных, а способы прослеживания восстановления — в качестве вспомогательных.

5. Если опытная информация представлена только данными восстановления уровня, то помимо высказанных выше соображений критерием достоверности можно считать сходимость параметров, рассчитанных способами временно̀го и площадного прослеживания.

Анализ закономерностей восстановления уровня обнаруживает, что способы обработки опытной информации, получаемой на стадии восстановления, зависят от характера возмущения:

а) при постоянном дебите требуется учет «наследства» откачки, что достигается введением сложного времени $\left(\frac{t}{T+t}\right)$;

б) при скачкообразном изменении дебита дополнительно требуется учет «наследства» характера возмущения, что достигается введением приведенного сложного времени $\left(\frac{t_{пр}}{(T_i+t_i)_{пр}}\right)$;

в) для учета наследства линейного, логарифмического и обратного логарифмического изменения дебита отсутствуют теоретически обоснованные способы обработки, поэтому при прослеживании восстановления после возмущения данного характера возможно лишь приближенное определение параметров.

Обработка опытной информации на стадии восстановления может производиться:

а) способом временно̀го прослеживания с учетом «наследства» предыдущей стадии, включая характер возмущения;

б) способом площадного прослеживания при $t = \text{const} < 0{,}1T$;

в) способом комбинированного прослеживания в ограниченном числе случаев при $t \leqslant 0{,}1T$.

Игнорирование характера возмущения при прослеживании восстановления уровня приводит к ощутимым систематическим ошибкам, знак и величина которых зависят от характера и степени возмущения, длительности опыта, удаленности наблюдательных скважин от возмущающих. Наибольших величин достигают ошибки при временно̀м прослеживании повышения уровня.

За исключением выпусков, способы обработки прослеживания понижения и повышения уровня, если и те и другие правильно учиты-

вают характер возмущения, следует считать равноценными. Следовательно, если факторы аномальности опытных закономерностей связаны только с характером возмущения, параметры, получаемые на стадиях понижения и восстановления, должны быть равны между собой при всех способах обработки: при временно̀м, площадном и комбинированном прослеживании. Напротив, расхождения между параметрами, полученными при прослеживании понижения и восстановления уровня с соблюдением необходимых приемов обработки, есть признак иных действующих факторов аномальности.

В настоящей главе приводятся приемы обработки опытной информации для тех случаев, когда переменный характер возмущения является единственным фактором аномальности; остальные условия, при которых справедлива формула Тейса — Джейкоба, сохраняются, т. е. испытуемый пласт является однородным, неограниченным в плане (на период опыта), напорным (или безнапорным при $S < 0{,}2h$). Однако и в тех случаях, когда данный фактор аномальности выступает в сочетании с другими, устранение аномалий, вызванных переменным характером возмущения, является обязательным. Это достигается, как было показано, с помощью приведенного времени, приведенного расстояния, приведенного понижения, учета «наследства» стадии понижения при прослеживании восстановления уровня.

Таким образом, выбор и использование необходимого приема обработки, учитывающего конкретный характер возмущения, является необходимой начальной ступенью интерпретации опытной информации, независимо от вида и количества факторов аномальности.

При отсутствии иных факторов, кроме переменного характера возмущения, изложенные способы и приемы обработки являются равноценными, следовательно, основным признаком условий подобного рода является стабильность получаемых параметров независимо от способа обработки (временно̀е, площадное, комбинированное прослеживание) и вида информации (на стадии понижения или восстановления уровня). Несоблюдение этого условия требует поиска иных вероятных факторов аномальности. Если сложный характер возмущения является единственным фактором аномальности, то обработку необходимо и достаточно производить двумя способами — на основе временно̀го и площадного прослеживания.

Усложнение характера возмущения при проведении опытов ведет к усложнению обработки опытной информации и увеличению ее трудоемкости. Прямым следствием этого является уменьшение точности определяемых параметров, вызванное увеличением числа расчетных операций и уменьшением абсолютных значений приведенных величин. В этих случаях едва заметное изменение углового коэффициента приводит к заметным относительным ошибкам. Следовательно, вероятность ошибок первичной обработки, случайных по

своей природе, возрастает с усложнением характера возмущения, усложнением приемов обработки. По этой причине вполне естественно стремление к проведению опытных откачек с постоянным дебитом.

Описанные в настоящей главе способы обработки опытной информации при сложном возмущении пласта предназначены для случаев, когда сложный характер возмущения является вынужденным, нерегулируемым. Это относится к выпускам, когда характер возмущения не может быть задан исследователем, к групповым опытам, когда необходимая степень возмущения не обеспечивается одной скважиной, наконец, к вынужденным перерывам в работе насосного оборудования. Способы обработки при сложном возмущении необходимы также при анализе опыта эксплуатации водозаборов или водоотлива.

Глава 4

# ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ В ПЛАНЕ ОДНОРОДНЫХ НАПОРНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ГРАНИЦ

Как было показано в главе 1, опытные закономерности понижения (восстановления) уровня испытывают различное деформирующее влияние границ водоносных пластов в зависимости от их природы, конфигурации и положения относительно возмущающих и наблюдательных скважин. Природа границ определяется реальной гидрогеологической обстановкой (наличием тектонических или литологических контактов с непроницаемыми или слабопроницаемыми породами, наличием гидравлической связи с поверхностными водотоками или водоемами). Первые из названных границ являются фактором отрицательных аномалий, которые на графиках временно́го прослеживания выражаются увеличением темпа понижения или восстановления уровня. Гидравлическая связь с поверхностными водотоками и водоемами является фактором положительных аномалий, которые выражаются уменьшением темпа понижения или повышения уровня во времени. Аналогично по характеру аномальности действие границ неоднородности — границ между водоносными породами различной водопроводимости или водоотдачи. В зависимости от отношения этих показателей испытуемой и контактирующих зон возникают как положительные, так и отрицательные аномалии.

Особенности обработки опытной информации в ограниченных пластах связаны с необходимостью расшифровки аномалий графиков прослеживания. Для расшифровки аномалий существенное значение имеет положение возмущающих и наблюдательных скважин относительно границ. При положении наблюдательной скважины на границе или в непосредственной близости от нее опытная закономерность понижения или повышения уровня несет информацию о фильтрационных свойствах пласта и влиянии действующей границы. Если возмущающая и наблюдательная скважины расположены достаточно далеко от границы, то закономерность изменения уровня несет информацию только о фильтрационных и емкостных свойствах испытуемого пласта, а влияние действующей границы пренебрежимо

мало. Между этими крайними вариантами может существовать целый ряд промежуточных, когда в одной и той же опытной закономерности участки отвечают этим крайним вариантам с переходными отреэками кривой. Протяженность каждого из них по времени будет эависеть от конкретного положения возмущающей и наблюдательной скважины относительно границ.

Задача интерпретации опытных данных в условиях действующих границ в тех пределах, которые поэволяют воспольэоваться методом Джейкоба, заключается в поисках представительного участка на временны́х и комбинированных и представительных моментов времени на площадных графиках прослеживания. Успех этого поиска решает вопрос о том, какими критериями пользоваться при этом. Практически выделение представительных участков производилось до сих пор по форме графиков. За представительные принимаются обычно начальные участки временны́х графиков прослеживания. Ранее [106] на ряде примеров нами было показано, что графики прослеживания, несущие информацию о различном влиянии границ, в начальный период совершенно аналогичны по форме. На основании этого был сделан вывод о том, что форма деформаций не может быть надежным критерием для выбора представительного участка графика прослеживания.

Существуют также аналитические критерии для установления факта влияния границ. Последние включают в качестве исходных данных квадрат расстояния до границ и коэффициент пьеэопроводности [22], они распространяются на случаи, когда действие границ может быть приравнено к эеркальным отображениям одинаковой с реальным воэмущением интенсивности. Воспользоваться этими критериями не всегда возможно, поскольку расстояние до границ во многих случаях иэвестно лишь приблизительно, а действительным коэффициентом пьеэопроводности к началу обработки мы вообще не располагаем. Отсутствие надежных критериев для диагностирования опытных эакономерностей иэменения уровня становится причиной широко распространенных ошибок квалификации расчетного участка. Эти ошибки являются систематическими. Знак таких ошибок определяется природой действующих границ — фактором аномальности: при положительных факторах — ошибки в сторону завышения, при отрицательных — в сторону занижения коэффициентов водопроводимости. Величина ошибок эависит от степени аномальности опытных закономерностей и положения возмущающих и наблюдательных скважин относительно действующих границ. Величины ошибок иэменяются в очень широких пределах и в наиболее грубых случаях многократны. Основным свойством параметров, определяемых с ошибкой квалификации, или кажущихся [106] параметров, является их нестабильность, т. е. зависимость от характера, интенсивности, длительности возмущения, местоположения опытной и наблюдательной скважин. Это свойство служит диагностирующим признаком ошибок квалификации.

## 1. КРИТЕРИЙ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ДЖЕЙКОБА В ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛАСТАХ

Как указывалось, основной вопрос интерпретации опытной информации в ограниченных пластах заключается в поиске представительного участка на временны́х и представительных моментов времени на площадных графиках прослеживания.

Под представительным следует понимать такой участок опытной закономерности изменения уровня, который формируется в условиях квазистационарности и пренебрежимо малого влияния действующих гра́ниц пласта. Этот участок должен быть достаточно протяженным во времени для того, чтобы при рассеянии экспериментальных точек и общепринятой периодичности замеров можно было бы достаточно обоснованно проводить осреднение при временно́м прослеживании изменений уровня. Интересующий нас критерий можно определить таким приведенным расстоянием $\bar{r}$ конкретной наблюдательной скважины, при котором опытная закономерность изменения уровня с достаточной для практики точностью в течение достаточно продолжительного отрезка времени может быть описана уравнением Тейса — Джейкоба. Это значит, что для определения основных гидрогеологических параметров можно воспользоваться методом Джейкоба, т. е. способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания изменения уровня.

Приведенное расстояние $\bar{r}$ — это отношение расстояния возмущающей скважины до границы $l$ к расстоянию от возмущающей до наблюдательной скважины $r$: $\bar{r} = \frac{l}{r}$. Такой критерий был бы наиболее приемлемым, так как в него входят все известные величины, а зависимость от расстояния $l$ — в первой степени. Этот критерий можно получить аналитически следующим способом.

Поскольку предполагается получение представительного прямолинейного полулогарифмического временно́го графика, его протяженность во времени представляется кратной контрольному времени $t_к$. Тогда продолжительность представительного участка $t_{пр}$ равна: $t_{пр} = nt_к$, где $t_к = \frac{r^2}{0{,}4a}$, и должна быть такой, чтобы при допустимом рассеянии точек прямолинейность временного графика прослеживания была бы очевидной. Это условие зависит в основном от периодичности замеров и характера работы насосного оборудования. Коэффициент $n$, определяющий кратность контрольному времени и зависящий от техники возмущения и измерений, может быть найден опытным путем.

Для случаев, когда границы пласта моделируются зеркальным отображением источников (стоков) одинаковой интенсивности (равенство дебитов), зададимся условием, чтобы понижение от зеркального отображения источника (стока) $s_0$ составляло не более 10% от понижения, вызванного действием реального возмущения ($S_р$),

тогда:

$$\frac{S_p}{S_0} = \frac{\ln \frac{2{,}25at}{r^2}}{E_i\left(-\frac{\rho^2}{4at}\right)} = 10. \qquad (4.1)$$

Представляем время, равное продолжительности представительного участка, выраженное через величину кратную контрольному времени:

$$t = t_{пр} = n \cdot t_к = \frac{n \cdot r^2}{0{,}4a}.$$

После подстановки получаем выражение, в котором величина коэффициента $n$ определяется только отношением расстояния до зеркального отображения к расстоянию до возмущающей скважины:

$$E_i\left(-\frac{0{,}1}{n} \cdot \frac{\rho^2}{r^2}\right) = 0{,}23 \lg 5{,}6n.$$

Задаваясь значениями коэффициента пропорциональности $n = 0{,}5$; 1; 3; 5; 7; 10, получаем соответственно ряд значений отношения $\frac{\rho}{r}$. Имея отношения $\frac{\rho}{r}$ для ряда значений $n$, находим отношения $\frac{l}{r} = \bar{r}$.

Предполагая, что зависимость приведенного расстояния от этого коэффициента будет определяться ориентировкой лучей относительно действующих границ, вычисляем приведенное расстояние для трех направлений: для луча, параллельного границе, луча, нормального к ней (встречного), и нормального, но противоположного (внутреннего) направления. Два последних направления, очевидно, представляют собой крайние случаи всех возможных направлений, а параллельное границе — средний случай.

По полученным данным строим графики $\bar{r} = f(n)$ (рис. 9).

Практически представляет интерес величина предельного приведенного расстояния $\bar{r}_{пр}$. Для этого требуется обосновать необходимую и достаточную величину коэффициента $n$. Нами проанализировано 139 графиков прослеживания, на каждом из которых определена достаточная и необходимая продолжительность представительного участка, кратная контрольному времени. По выборке из 139 значений найдено, что наиболее часто встречающиеся значения коэффициента пропорциональности $n = 5$.

По графикам рис. 9 находим значения $\bar{r}_{пр}$, соответствующие значению $n = 5$. В зависимости от направления луча относительно границы $\bar{r}_{пр}$ находится в пределах 2,5—3,5.

Поскольку величина гидравлического сопротивления зависит от конфигурации границ, очевидно, величина предельного приведенного расстояния может зависеть от числа отображений, отвечающих конкретной расчетной схеме. Проследим возможность и степень такой зависимости. Если выразить различную сложность границ числом зеркальных отображений $m$ и при этом допустить для простоты анализа заведомо неблагоприятное условие примерного равенства

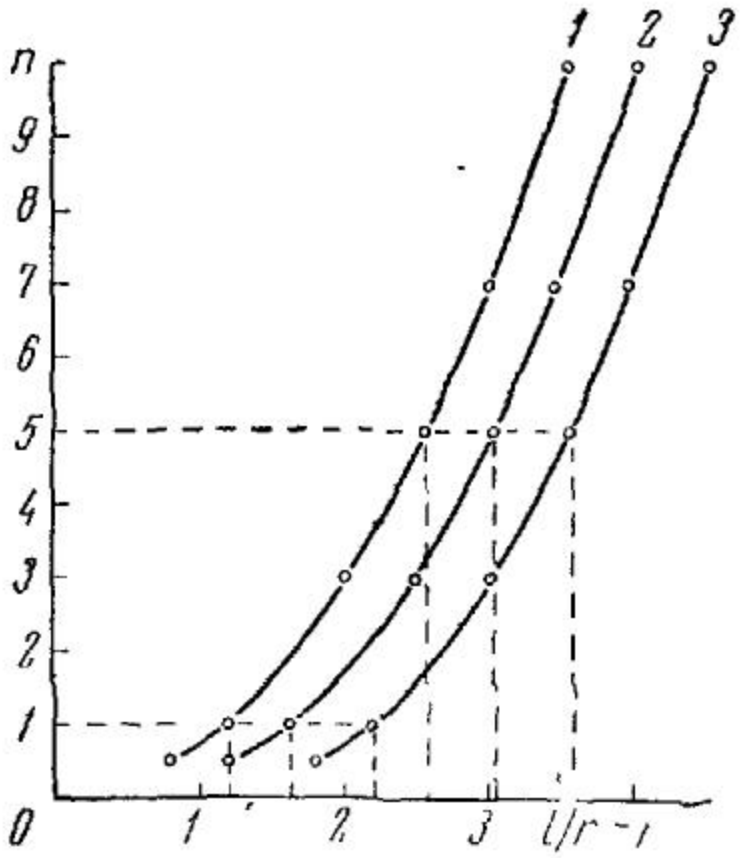
и минимального значения расстояний от зеркальных отображений до интересующей наблюдательной скважины, вывод предельного приведенного расстояния, как и в предыдущем случае, можно произвести, задаваясь допустимым расхождением в 10%. Порядок расчета и его результаты для параллельного луча представлены на рис. 10.

Рис. 9. Зависимость продолжительности представительного участка от положения наблюдательных скважин в ограниченных пластах

1. $\frac{l}{r} = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{r} - 1\right)$ — внутренний луч

2. $\frac{l}{r} = \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{\rho}{r}\right)^2 - 1}$ — параллельный луч.

3. $\frac{l}{r} = \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{r} + 1\right)$ — встречный луч.




| $n$ | $0{,}23 \lg 5{,}6n$ | $\frac{0{,}1}{n} \cdot \frac{\rho^2}{r^2}$ | $\frac{0{,}1}{n}$ | $\frac{\rho^2}{r^2}$ | $\frac{\rho}{r}$ | $l/r$ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 0,5 | 0,130 | 1,35 | 0,2 | 6,75 | 2,6 | 0,8 | 1,2 | 1,8 |
| 1,0 | 0,173 | 1,15 | 0,1 | 11,5 | 3,4 | 1,2 | 1,63 | 2,2 |
| 3,0 | 0,283 | 0,85 | 0,033 | 25,6 | 5,05 | 2,02 | 2,5 | 3,02 |
| 5,0 | 0,336 | 0,76 | 0,02 | 38,0 | 6,16 | 2,58 | 3,04 | 3,58 |
| 7,0 | 0,367 | 0,71 | 0,0143 | 49,6 | 7,04 | 3,02 | 3,47 | 4,02 |
| 10,0 | 0,40 | 0,67 | 0,01 | 67,0 | 8,2 | 3,6 | 4,07 | 4,6 |

Как видно, существенное изменение критерия $\bar{r}_{пр} = 3—4{,}5$ отмечается в интервале $m = 1—4$. При значениях $m > 4$ $\bar{r}_{пр}$ мало зависит от числа отображений. При этом следует помнить, что в основу вывода положено явно неблагоприятное условие: $\rho_1 \approx \rho_2 \approx \ldots \approx \rho_n$. Следовательно, в реальных условиях при сложной конфигурации границ $\bar{r}_{пр}$ будет меньше, и график реальной зависимости должен располагаться левее полученного на рис. 10. Практически можно принять $\bar{r}_{пр} = 3—4$. Величины предельного приведенного расстояния, в зависимости от направления лучей и конфигурации границ, получены для граничных условий, при постоянстве напора и нулевого расхода ($H = \text{const}$, $Q = 0$). Рассмотрим возможные отступления от этих условий.

Первое отступление относится к границам $H = \text{const}$. Оно обусловлено наличием дополнительного гидравлического сопротивления русел водотоков и водоемов и выражается гидравлическим сопротивлением дополнительного участка водоносного горизонта длиной $\Delta L$, эквивалентного сопротивлению русловых отложений [135].

Следовательно, предельное приведенное расстояние для прибрежных опытных участков должно бы определяться с учетом $\Delta L$ : $\bar{r}_{\text{пр}} = \frac{l+\Delta L}{r} \approx 3$ для параллельного луча. Однако, как следует из работы [47], введение дополнительной емкости связано с ошибкой, величина которой за время, соизмеримое с продолжительностью опытных откачек, достигает 35%. Поэтому лучше игнорировать $\Delta L$ в приведенном расстоянии. Без учета дополнительного гидравлического сопротивления предельное приведенное расстояние для прибрежных опытных участков в зависимости от величины последнего

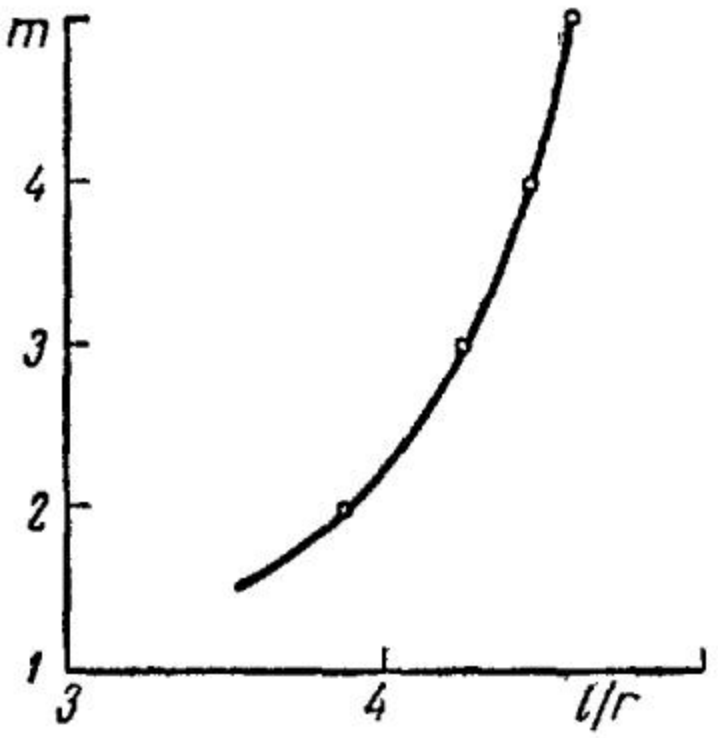



Рис. 10. Зависимость критерия $\bar{r} = \frac{l}{r}$ от конфигурации границ пласта ($m$ — число отображений)

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\ln \frac{2{,}25\,at}{r^2}}{mE_i\left(-\frac{\rho^2}{4at}\right)} = 10 \qquad t = \frac{5r^2}{0.4a}$$

$$\rho_1 \approx \rho_2 \approx \rho_n \qquad E_i\left(-0{,}02\,\frac{\rho^2}{r^2}\right) = \frac{0{,}336}{m}$$

| $m$ | $\frac{0{,}336}{m}$ | $0{,}02\,\frac{\rho^2}{r^2}$ | $\frac{\rho^2}{r^2}$ | $\frac{\rho}{r}$ | $\approx\frac{l}{r}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,168 | 1 20 | 60,0 | 7,75 | 3,88 |
| 3 | 0,112 | 1,45 | 72,5 | 8,5 | 4,25 |
| 4 | 0,084 | 1,60 | 80,0 | 8,94 | 4,46 |

будет $\bar{r}_{\text{пр}} < 3$. Если мы воспользуемся этой величиной, например, при постановке опыта, то этим достигается определенная дополнительная гарантия представительности начального участка.

Второе отступление связано с границами неоднородности. Неоднородность может быть по водопроводимости или водоотдаче. Нетрудно показать, что границы неоднородности в отношении величины предельного приведенного расстояния представляют собой промежуточные случаи (между случаями непроницаемых границ и границ с постоянным напором).

Действие границы неоднородности по водопроводимости, как следует из работы [75], моделируется зеркальным отображением возмущения с меньшей интенсивностью, чем реальное возмущение. Дебит отображения равен дебиту реального возмущения, умноженному на коэффициент $\alpha$, равный отношению разности коэффициентов водопроводимости смежных зон к их сумме. Следовательно, этот коэффициент всегда меньше единицы. Тогда исходное отношение (4.1) можно записать так:

$$\frac{S_p}{S_0} = \frac{\ln \frac{2{,}25\,at}{r^2}}{\alpha E_i\left(-\frac{\rho^2}{4at}\right)} = 10, \qquad (4.2)$$

тогда

$$E_i\left(-\frac{0{,}1}{n}\cdot\frac{\rho^2}{r^2}\right)=\frac{0{,}23\lg 5{,}6n}{\alpha}.$$

Поскольку $\alpha<1$, экспоненциальная интегральная функция возрастает, а ее аргумент уменьшается. Уменьшение аргумента при постоянном $n$ возможно только за счет уменьшения отношения $\frac{\rho}{r}$. Следовательно, по сравнению с заданными условиями, т. е. равенством дебитов возмущений и их отображений, величина предельного приведенного расстояния для границ неоднородности будет меньше.

Таким образом, область предельных приведенных расстояний для границ неоднородности по $km$ в зависимости от направления лучей будет левее области, изображенной на рис. 9 для первоначально заданных условий, например для встречного луча $\bar{r}_{пр}<3{,}5$.

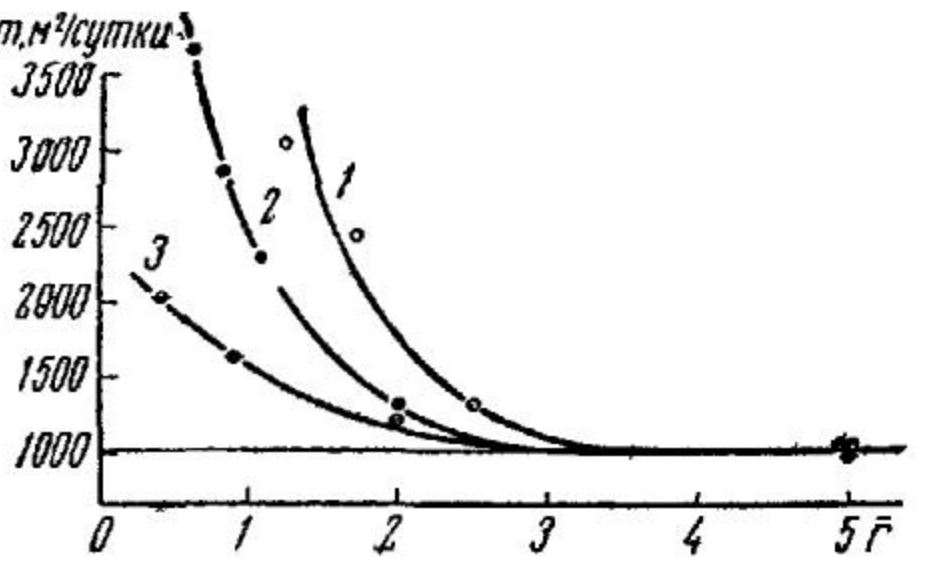



Рис. 11. Зависимость $km$ от приведенного расстояния в условиях границы неоднородности по водоотдаче для трех направлений (моделирование на МСМ-1)

для лучей:

*1* — встречного, *2* — параллельного, *3* — внутреннего по отношению к границе

Разберем вариант с границей неоднородности пласта по водоотдаче. Поскольку для общего случая такой неоднородности отсутствуют удовлетворительные решения притока воды к скважине, воспользуемся данными моделирования на аналоговой установке МСМ-1. Водоотдача двух смежных зон с линейной границей между ними различалась в 100 раз. Возмущение производилось в зоне с меньшей водоотдачей. Точки съема информации располагались в той же зоне в диапазоне приведенного расстояния $\bar{r}=0{,}4$—$5$ по трем направлениям: встречному, параллельному и внутреннему. Представив результаты моделирования в виде графиков комбинированного прослеживания, определяем коэффициенты водопроводимости по начальным участкам. По полученным данным строим график $km=f(\bar{r})$. Как видно на рис. 11, общий график в интервале $\bar{r}=5$—$3$, параллельный оси приведенных расстояний, расходится при $\bar{r}\leqslant 3$ на три ветви, отвечающие избранным направлениям лучей: нижний — внутреннему, средний — параллельному, верхний — встречному. Следовательно, предельное приведенное расстояние для случая неоднородности по водоотдаче независимо от направления лучей $\bar{r}_{пр}=3$. При большей разности в водоотдаче предельное приведенное расстояние может быть несколько более трех.

В общем случае действия границ неоднородности по водоотдаче интересующий нас критерий $\bar{r}_{пр}=3$.

*Форма графика на рис. 11, в частности расхождение его в соответствии с направлением лучей, свидетельствует о том, что ошибка*

квалификации начального участка за пределами площадного ограничения зависит от направления луча. Так, при $\bar{r} = 2$ ошибка на внутреннем луче может быть до 20%, на параллельном 30% и на встречном 80%.

Определим диапазон предельного приведенного расстояния в зависимости от исследованных факторов:

1) в зависимости от направления луча относительно границы $\bar{r}_{пр} = 2{,}5—3{,}5$;

2) в зависимости от конфигурации границ $\bar{r}_{пр} = 3 \div 4$;

3) в зависимости от величины дополнительного гидравлического сопротивления при $H = \text{const}$, $\bar{r}_{пр} \leqslant 3{,}5$;

4) в условиях границ неоднородности по водопроводимости в зависимости от отношения водопроводимостей смежных зон $\bar{r}_{пр} \leqslant 3{,}5$;

5) в условиях границ неоднородности по водоотдаче $\bar{r}_{пр} \approx 3$.

Для большинства анализируемых факторов предельное приведенное расстояние $\bar{r}_{пр} = 3{,}5$ является крайним случаем и относится к непроницаемой границе и встречному лучу. Практически независимо от природы границ, их конфигурации, фильтрационных свойств и направления лучей можно принять $\bar{r}_{пр} = 3{,}5$.

Полученный критерий $\bar{r}_{пр} \geqslant 3{,}5$ представляет собой такое приведенное расстояние интересующей наблюдательной скважины относительно возмущающей и границ пласта, при котором влияние действующих границ на опытную закономерность изменения уровня на протяжении времени $t = 5t_к$ в среднем не превышает 10% от величины общего понижения. Указанной протяженности начального участка временно́го графика прослеживания в большинстве случаев достаточно для его надежной интерпретации и построения площадных графиков на два-три момента времени при $t < 5t_к$.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В ОГРАНИЧЕННЫХ ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТАХ

Все случаи, рассматриваемые в настоящем разделе, предполагают справедливым условие $l \gg m$, т. е. расстояние до границы пласта намного превышает мощность водоносного горизонта, что в подавляющем большинстве случаев легко выполнимо. Случаи при обратном условии чрезвычайно сложные для интерпретации встречаются относительно редко и здесь не рассматриваются.

### Зональность области возмущения

Полученные в предыдущем разделе критерии предельного приведенного расстояния в ограниченном относительно равномерно проницаемом водоносном пласте позволяют представить всю область опытного возмущения, состоящей из нескольких зон в зависимости

от степени деформации гидродинамической сетки во времени и по площади. Предполагаемая зональность области возмущения поможет сформулировать основные принципы интерпретации в зависимости от положения точки съема информации в той или иной зоне.

В направлении от центра к периферии депрессионной воронки выделяются следующие зоны (рис. 12).

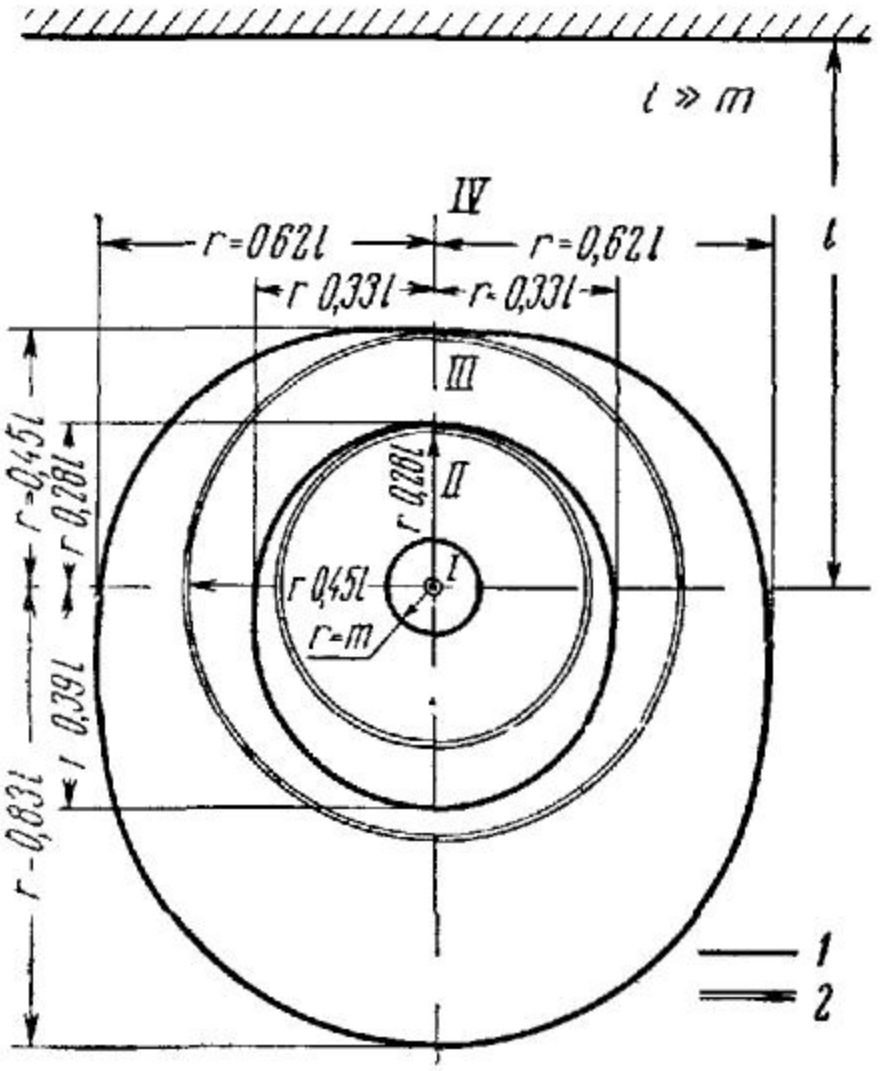



Рис. 12. Зональность области опытного возмущения в ограниченных пластах:

*1* — расчетные границы зон; *2* — рекомендуемые границы

| № зон | Временные ограничения | Площадные ограничения | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | встречный луч | параллельный луч | внутренний луч | рекомендуемые |
| I | $t > 5t_к$ | $r = m$ | $r = m$ | $r = m$ | $r = m$ |
| II | $t > 5t_к$ | $r = 0{,}28l$ | $r = 0{,}33l$ | $r = 0{,}39l$ | $r = 0{,}28l$ |
| III | $t_к < t \leqslant 5t_к$ | $r = 0{,}45l$ | $r = 0{,}62l$ | $r = 0{,}83l$ | $r = 0{,}45l$ |
| IV | $t \leqslant t_и$ | $r = l$ | – | – | – |

I. Зона прискважинных деформаций, обусловленных скин-эффектом или прискважинными помехами. Радиус этой зоны меньше или равен мощности водоносного горизонта.

Результатом прискважинных деформаций является завышение понижений и увеличение темпа понижения в начальный период возмущения. Протяженность этого периода обычно неизвестна, но практически небольшая при принятых продолжительностях опытных откачек.

II. Зона практического отсутствия деформаций гидродинамической сетки как со стороны прискважинных, так и со стороны граничных помех. Положение внешней границы этой зоны может быть

определено из величин предельного приведенного расстояния, полученного в предыдущем разделе для трех основных направлений: встречного $\bar{r}_{пр} = 3{,}5$, параллельного $\bar{r}_{пр} = 3$ и внутреннего $\bar{r}_{пр} = 2{,}5$. Отсюда внешняя граница зоны находится от центра возмущения на расстояниях по направлениям: встречному $r_2 = \frac{l}{3{,}5} = 0{,}28l$; параллельному $r_2 = 0{,}33l$; внутреннему $r_2 = \frac{l}{2{,}5} = 0{,}4l$. Как видно, внешняя граница нейтральной зоны не является окружностью, но если принять за основу критерий предельного приведенного расстояния по встречному лучу, т. е. более жесткий критерий, то радиус нейтральной зоны практически можно принять равным $r_2 \approx 0{,}3l$. В эту зону попадают все наблюдательные скважины с расстоянием от возмущающей $m < r < 0{,}3l$. По графику на рис. 9 для всех скважин второй зоны при $\bar{r} > 3{,}5$ период времени, в течение которого влияние границы пренебрежимо мало (ошибка меньше 10%), $t \geqslant 5t_к$. Например, для скважин, расположенных в радиусе $r = 0{,}15l$, $t = 10t_к$. Такой продолжительности вполне достаточно, чтобы воспользоваться способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания.

III. Зона заметных деформаций гидродинамической сетки за счет граничных помех.

Положение внешней границы третьей зоны может быть определено из величин минимального приведенного расстояния. Последнее получаем с графика на рис. 9 при $n = 1$ для встречного направления $\bar{r}_{min} = 2{,}2$, параллельного $\bar{r}_{min} = 1{,}6$ и внутреннего $\bar{r}_{min} = 1{,}2$. Отсюда внешняя граница третьей зоны находится от центра возмущения по направлениям на расстояниях: встречному $r_3 = \frac{l}{2{,}2} = 0{,}45l$; параллельному $r_3 = \frac{l}{1{,}6} = 0{,}62l$; внутреннему $r_3 = \frac{l}{1{,}2} = 0{,}83l$.

Внешняя граница третьей, как и второй зоны не является окружностью, но практически, руководствуясь наиболее жестким критерием встречного луча, радиус ее можно принять примерно равным $r_3 \approx 0{,}45l$. В эту зону попадают скважины с расстоянием от возмущающей $0{,}3l < r < 0{,}45l$, что отвечает приведенному расстоянию $2{,}2 < \bar{r} < 3{,}5$. Тогда по графику на рис. 9 для всех скважин третьей зоны период времени, в течение которого влиянием границы можно пренебречь, находится в пределах $t_к < t < 5t_к$. Такой продолжительности ($t$) в ряде случаев недостаточно для способов временного и комбинированного прослеживания.

IV. Зона максимальных деформаций гидродинамической сетки за счет граничных помех. Ближняя граница этой зоны отстоит от центра возмущения: по встречному лучу на расстоянии $r_4 = 0{,}45l$; параллельному $r_4 = 0{,}62l$; внутреннему $r_4 = 0{,}85l$. Дальней границей этой зоны является граница водоносного пласта. Приведенные расстояния ближней границы по встречному, параллельному и вну-

треннему направлениям соответственно равны: $\bar{r} \leqslant 2{,}2$; 1,6; 1,2. Следовательно, согласно графику для наблюдательных скважин на рис. 9, в четвертой зоне справедливо условие $t \leqslant t_к$. Это значит, что наряду с максимальной степенью деформации гидродинамической сетки во всем диапазоне времени опыта не соблюдается также условие квазистационарности до наступления влияния границы.

Рассмотрим особенности интерпретации в пределах каждой из выделенных зон.

В зоне прискважинных помех определение основных гидрогеологических параметров производится по возмущающим и ближним наблюдательным скважинам; число последних из-за малых размеров зоны недостаточно для того, чтобы воспользоваться способом площадного прослеживания. Поэтому определение параметров производится способом временного прослеживания и по формуле Дюпюи для возмущающей или по возмущающей и наблюдательной скважинам. Остановимся вначале на способе временного прослеживания. Специфическим для этой зоны является наличие прискважинных помех и влияние нерегулярных колебаний дебита. Поэтому чтобы избежать влинния последнего обстоятельства при временном прослеживании, пользуются информацией, получаемой на стадии восстановления уровня.

Комплекс прискважинных помех является причиной завышения абсолютных величин понижений и деформации временно́го графика прослеживания. Поскольку эти помехи практически не устранимы аналитическими приемами, определение коэффициента пьезопроводности в возмущающих и ближних наблюдательных скважинах ($r_1 \leqslant \leqslant \frac{m}{2}$) не представляется возможным, а коэффициент водопроводимости определяется обычным способом по угловому коэффициенту конечного участка графика.

Основным вопросом интерпретации является здесь диагностирование представительного конечного участка. При отсутствии иных факторов аномальности вероятные ошибки квалификации расчетного участка́ ведут к занижению величины коэффициента водопроводимости.

Для расчета коэффициентов водопроводимости (фильтрации) по возмущающим или возмущающей и наблюдательной скважинам в справочной гидрогеологической литературе существует много формул [110], в разной мере и различными способами учитывающих степень несовершенства. Анализ способов определения коэффициентов фильтрации по данным откачек из несовершенных скважин выполнен в работе [148], авторы которой пришли к выводу, что наиболее достоверные результаты могут быть получены по формуле Дюпюи с поправками Веригина. Этот вывод верен, но следует заметить, что поправка́ми Веригина, учитывающими несовершенство только по степени вскрытия, не исключаются все виды прискважинных помех. По этой причине по формуле Дюпюи с поправками Веригина получают во многих случаях заниженные величины коэффициента

водопроводимости (фильтрации). Следовательно, определение необходимых расчетных параметров с гарантией необходимой достоверности возможно по наблюдательным скважинам за пределами первой зоны.

*В нейтральной зоне радиусом* $r_2 = 0{,}3l$, независимо от природы границ, фильтрационных и емкостных свойств водоносного горизонта и положения наблюдательных скважин в пределах зоны, опытная закономерность изменения уровня с достаточной для практики точностью (менее 10%) описывается уравнением Тейса — Джейкоба достаточно продолжительное время $t \geqslant 5t_к$. Следовательно, обработку опытных данных наблюдательных скважин, расположенных от центра возмущения в радиусе $m < r \leqslant 0{,}3l$, можно производить способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания. Сложность обработки будет определяться лишь характером возмущения. Приемы обработки при сложном характере возмущения изложены в предыдущей главе.

В зоне заметных деформаций за счет граничных помех отрезок времени, в течение которого справедливо уравнение Тейса — Джейкоба ($t_к < t < 5t_к$), недостаточен для того, чтобы воспользоваться способом временно́го прослеживания. Обработка способом площадного прослеживания при условии соответствия выбранных моментов времени указанным временны́м ограничениям производится так же, как и в предыдущем случае, т. е. используются все приемы, выведенные для неограниченного пласта в соответствии с характером возмущения. Для площадного прослеживания в этой зоне можно использовать скважины, расположенные в радиусе $m < r < 0{,}45l$, т. е. по сравнению с предыдущим в данном случае можно использовать более удаленные наблюдательные скважины.

Возможность использования способа площадного прослеживания для определения основных гидрогеологических параметров в ограниченных пластах, кроме критерия приведенного расстояния, ограничивается временны́м критерием. Критерий приведенного расстояния прост и выражается, по существу, в долях расстояния от центра возмущения до границы, положение которой нам известно. Временно́й критерий выражается в долях контрольного времени, но последнее определяется коэффициентом пьезопроводности.

Поэтому, строго говоря, мы не можем следовать этому критерию. Разберем, к каким последствиям приводит выход за временные ограничения при площадном прослеживании. Сделаем это на примере непроницаемой границы сложной конфигурации, для чего воспользуемся формулой (4.3) при условии $t = \text{const}$ и $t > 5t_к$:

$$S = \frac{MQ}{km} \cdot \lg \frac{2{,}25at}{(r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \ldots \cdot \rho_n)^i}, \qquad (4.3)$$

где $i = \frac{2}{n+1}$;

$M = 0{,}183\ (n + 1)$;

$n$ — число отображений.

Формулу при $t = \text{const}$ можно записать в виде уравнения прямой в координатах $S - \lg r$:

$$S = A - C \lg r;$$

$$C = \frac{M \cdot i \cdot Q}{n+1}, \quad A = C \cdot \lg \frac{(2{,}25at)^{1/i}}{\rho_1 \cdot \rho_2, \ldots, \rho_n};$$

$$M \cdot i = \frac{2}{n+1} \cdot 0{,}183\,(n+1) = 0{,}366, \quad km = \frac{0{,}366Q}{C}.$$

Следовательно, величина коэффициента водопроводимости остается независимой от временных ограничений.

Графики $S - \lg r$ будут прямолинейными при $A = \text{const}$, а это возможно при условии $\lg \rho_1 \approx \lg \rho_1'$; $\lg \rho_2 \approx \lg \rho_2'$ и т. д., $\rho_1, \rho_2, \ldots, \rho_n$ — расстояние от данной наблюдательной скважины до соответствующих отображений; $\rho_1', \rho_2', \ldots, \rho_n'$ — то же, для второй наблюдательной скважины. Это условие справедливо при заданных критериях приведенного расстояния.

$$\lg a = \frac{iA}{C} + i \lg (\rho_1 \cdot \rho_2, \ldots, \rho_n) - 0{,}35 - \lg t. \qquad (4.4)$$

Если площадное прослеживание производится на моменты времени в пределах временных ограничений, то $n = 0$, $i = 2$, а второй член в выражении (4.4) отсутствует. За пределами временных ограничений, в частности, при $t > 5t_к$, в формуле (4.4) для расчета коэффициента пьезопроводности появляется второй член, который при непроницаемых границах является положительным числом. Следовательно, коэффициент пьезопроводности оказывается завышенным. В данном и прочих случаях (граница $H = \text{const}$, граница неоднородности по водопроводимости и водоотдаче) выход за пределы временных ограничений, при сохранении площадных ограничений, не влияет на величину коэффициента водопроводимости, но, изменяя ординату площадного графика, влияет на величину коэффициента пьезопроводности. Знак ошибок будет определяться природой действующих границ, а величина — степенью превышения временных ограничений. Таким образом, за пределами временных ограничений определяются кажущиеся коэффициенты пьезопроводности, основным свойством которых является нестабильность во времени. Поэтому в тех случаях, когда выбранные для площадного прослеживания моменты времени нельзя контролировать временным критерием, в качестве расчетных следует принимать величины коэффициента пьезопроводности, полученные на ранние моменты, когда эти величины не слишком различны по времени. При рассредоточенном расположении наблюдательных скважин, когда они находятся в пределах зон II и III, превышение временных ограничений в переходные моменты времени от начальной к конечной закономерности может иметь результатом и некоторое искажение формы площадного графика. Но это обстоятельство контролируемо, а следовательно, устранимо выбором подходящих моментов для площадного прослеживания.

Иллюстрацией к сказанному служит рис. 13, на котором построены графики площадного прослеживания по данным моделирования для схемы с границей неоднородности по водоотдаче по параллельному лучу. За пределами временных ограничений ($t = 5$ суток), но в пределах ограничений по расстоянию ($\overline{r} \geqslant \geqslant 1{,}5$) коэффициент водопроводимости стабилен и равен заданной величине ($km = 1000$ м²/сутки). В то же время коэффициент пьезопроводности, стабильный в пределах временных ограничений ($t = 2$ суток), нестабилен во времени за их пределами.

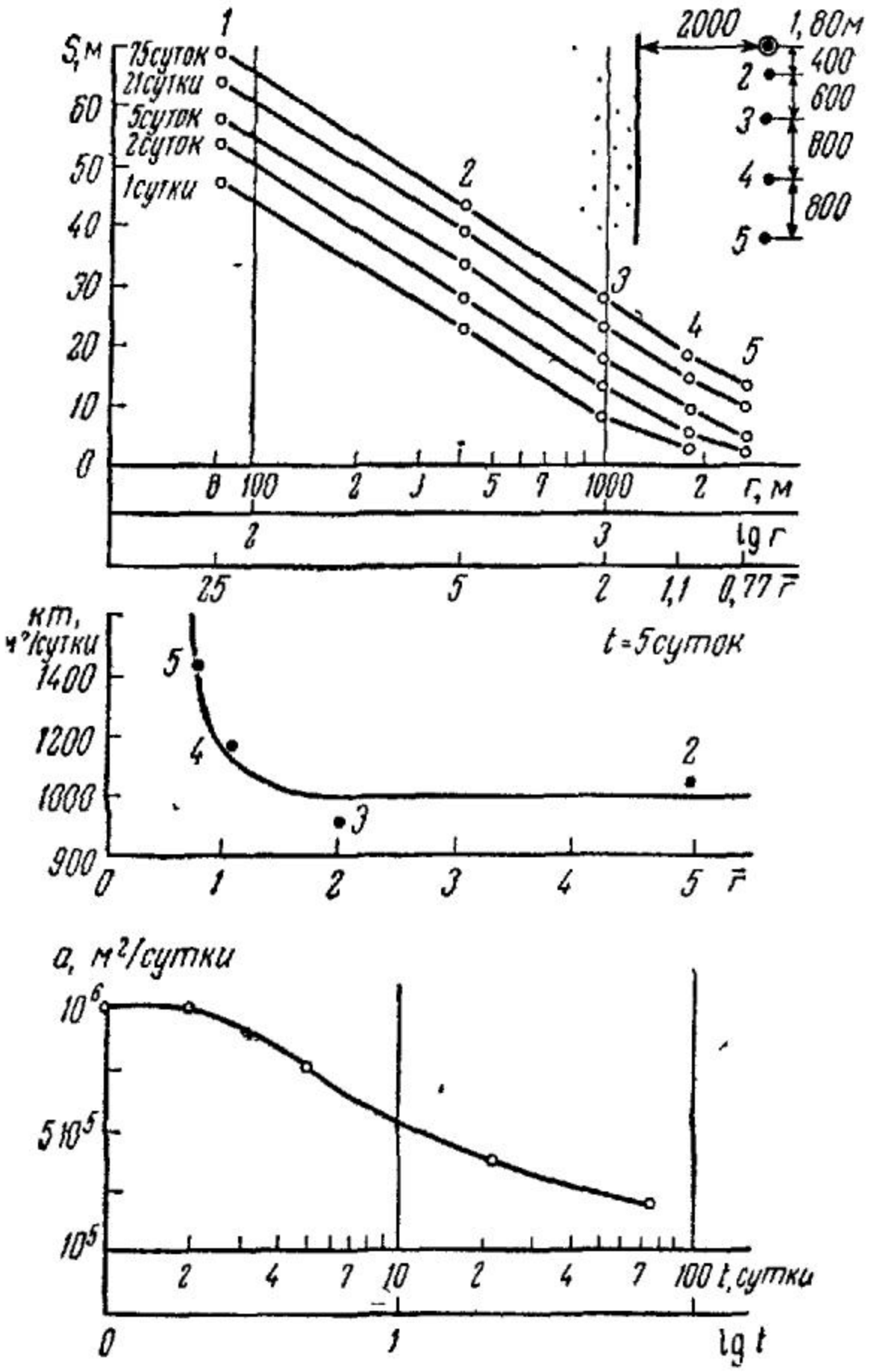



Рис. 13. Характер площадных закономерностей понижения в полуограниченном напорном пласте с границей неоднородности по водоотдаче (моделирование на МСМ-1 по данным Б. М. Зильберштейна)

В области максимальных деформаций за счет граничных помех, т. е. в радиусе $r_4 > 0{,}45l$ и при $t \leqslant t_к$, ни в один из моментов времени не соблюдаются условия уравнения Тейса — Джейкоба, даже с заданным приближением. Следовательно, определение действительных параметров по наблюдательным скважинам, попадающим в четвертую зону, т. е. в радиусе $r_4 > 0{,}45l$, невозможно без учета влияния границ ни способом площадного, ни, тем более, способами временного и комбинированного прослеживания.

Рассмотрим особенности обработки опытной информации каждым из предлагаемых способов.

## Обработка способом временного прослеживания

Основным вопросом интерпретации временных графиков прослеживания является диагностирование представительного участка. Все графики независимо от местоположения скважин в опробуемой зоне пласта, как правило, однотипны по форме, но несмотря на это,

в зависимости от относительного местоположения наблюдательных скважин они несут различную информацию, поэтому из всей совокупности графиков необходимо выбрать те, начальные участки которых или графики в целом, несут ограниченную информацию, в частности информацию только о фильтрационных и емкостных свойствах испытуемого пласта. Этому условию удовлетворяют наблюдательные скважины, расположенные в радиусе $m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$ от центра возмущения. Следовательно, из всей совокупности наблюдательных скважин необходимо выбрать те, которые удовлетворяют данному условию, и определить параметры по начальным прямолинейным участкам этих графиков. Для расчета параметров при сложном характере возмущения выбирается тот прием, который соответствует конкретному характеру опытного возмущения. Если имеется несколько наблюдательных скважин, целесообразно построить график зависимости $km = f(\bar{r})$. Этот график одновременно является проверкой стабильности коэффициента водопроводимости в зависимости от местоположения наблюдательных скважин и способом его осреднения (см. рис. 15, 16).

Обратимся к примерам интерпретации опытных данных в ограниченных пластах.

В пределах участка Бешбулак в Центральных Кызылкумах опробован сенон-туронский водоносный горизонт. Опробование произведено мощным групповым выпуском из трех скважин. Центр возмущения расположен в 5000 м от границы с безнапорной зоной (граница неоднородности по водоотдаче). Возмущение в течение 31 суток распространилось в радиусе 8000 м. Опытная информация снималась в 14 наблюдательных скважинах, расположенных на расстоянии 800—5000 м от центра возмущения. Обработка опытных данных способом временного прослеживания произведена по всем наблюдательным скважинам, с учетом изменения дебита. На примере временных графиков понижения в скв. 13 и 19, расположенных соответственно в 815 и 2900 м от центра возмущения (рис. 14), видно, что они совершенно однотипны, но коэффициенты водопроводимости заметно отличаются (610 и 814 м²/сутки). По всей совокупности коэффициента водопроводимости построен график $km = f(\bar{r})$ по данным понижения уровня (рис. 15, *б*). Как видно, на графике нестабильные величины коэффициента водопроводимости стремятся к некоторой постоянной величине $km = 580$ м²/сутки при значении приведенного расстояния $\bar{r} \approx 3$, что отвечает предельному расстоянию для границы неоднородности по водоотдаче. В данном случае большинство наблюдательных скважин попадает в зону заметных граничных помех и только две находятся в нейтральной зоне. По ним и можно определить действительные параметры $km = 580$ м²/сутки, $a = 3 \cdot 10^6$ м²/сутки. Без учета граничных помех среднеарифметическое из 14 значений составит: $km = 760$ м²/сутки, $a = 2{,}0 \cdot 10^6$ м²/сутки. Отсюда ошибка квалификации расчетного участка составляет 31%.

Аналогичную зависимость параметров от граничных помех можно видеть на примере участка Аймурза, где фактором аномальности также является граница неоднородности по водоотдаче (рис. 15, *а*). От предыдущего этот участок отличается тем, что здесь в нейтральную зону попадает большее количество наблюдательных скважин, но как и для Бешбулакского участка мы получаем одинаковые стабильные значения параметров при прослеживании понижения уровня.

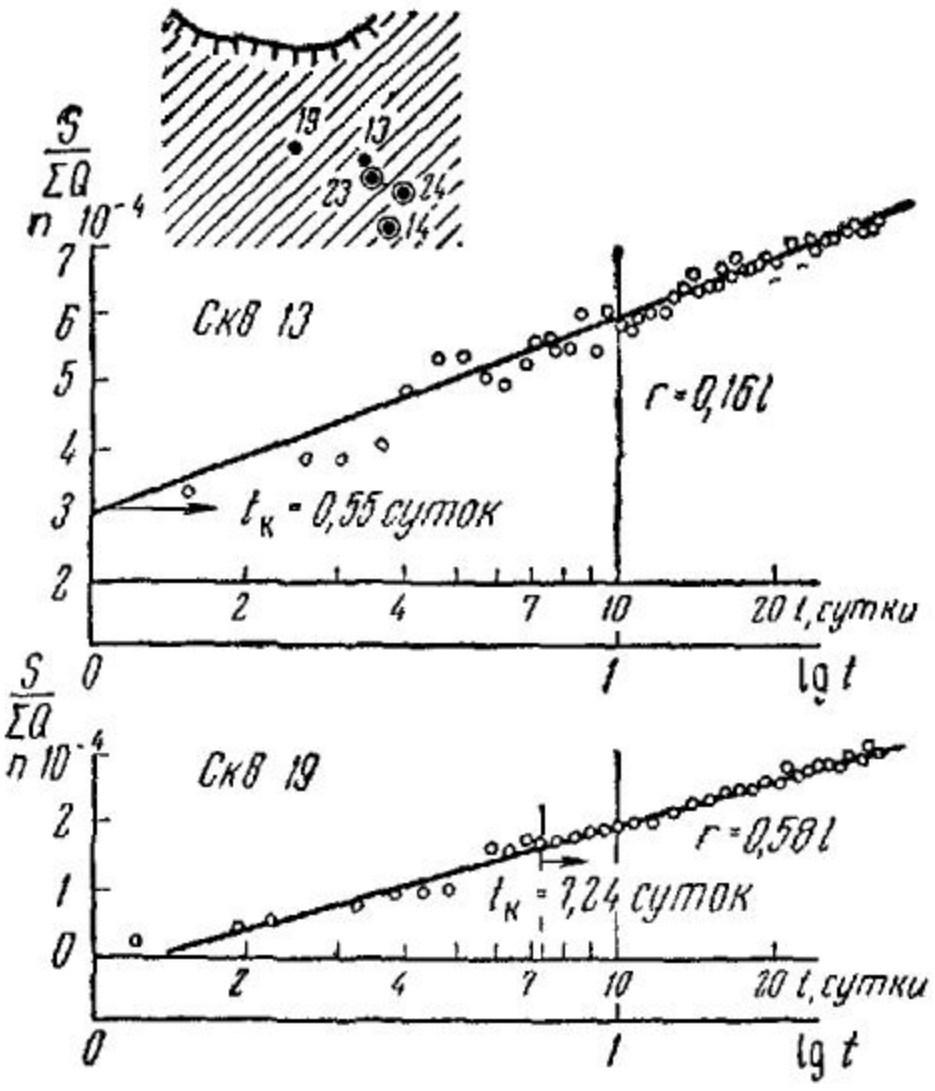



Рис. 14. Графики временного прослеживания приведенного понижения в разноудаленных наблюдательных скважинах при групповом выпуске из скв. 14, 23, 24 (по данным А. В. Иванова, 1964 г., Центральные Кызылкумы).

| № наблюдательной скважины | $r_{пр}$ | $C$ | $km = \frac{0,183}{C}$ | $A$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 815 | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | 610 | $3,0 \cdot 10^{-4}$ | $3,0 \cdot 10^{6}$ |
| 19 | 2900 | $2,25 \cdot 10^{-4}$ | 814 | $-0,25 \cdot 10^{-4}$ | $2,9 \cdot 10^{6}$ |

Стабильные значения параметров получаются на участке Аймурза при $\bar{r} \geqslant 3$.

Зависимость коэффициента водопроводимости от приведенного расстояния на прибрежном участке видна на примере Курского водозабора (рис. 16). Как видно, относительно стабильные значения удается получить при $\bar{r}_{пр} \geqslant 2,5$, что в общем отвечает полученному ранее значению предельного приведенного расстояния без учета дополнительного гидравлического сопротивления русла. Это свидетельствует о малой величине последнего. В данном примере представительные наблюдательные скважины оказываются в зоне возможного влияния несовершенства возмущающей скважины (скв. 300, 166), однако проверка по площадному графику свидетельствует о практическом отсутствии этого влияния.

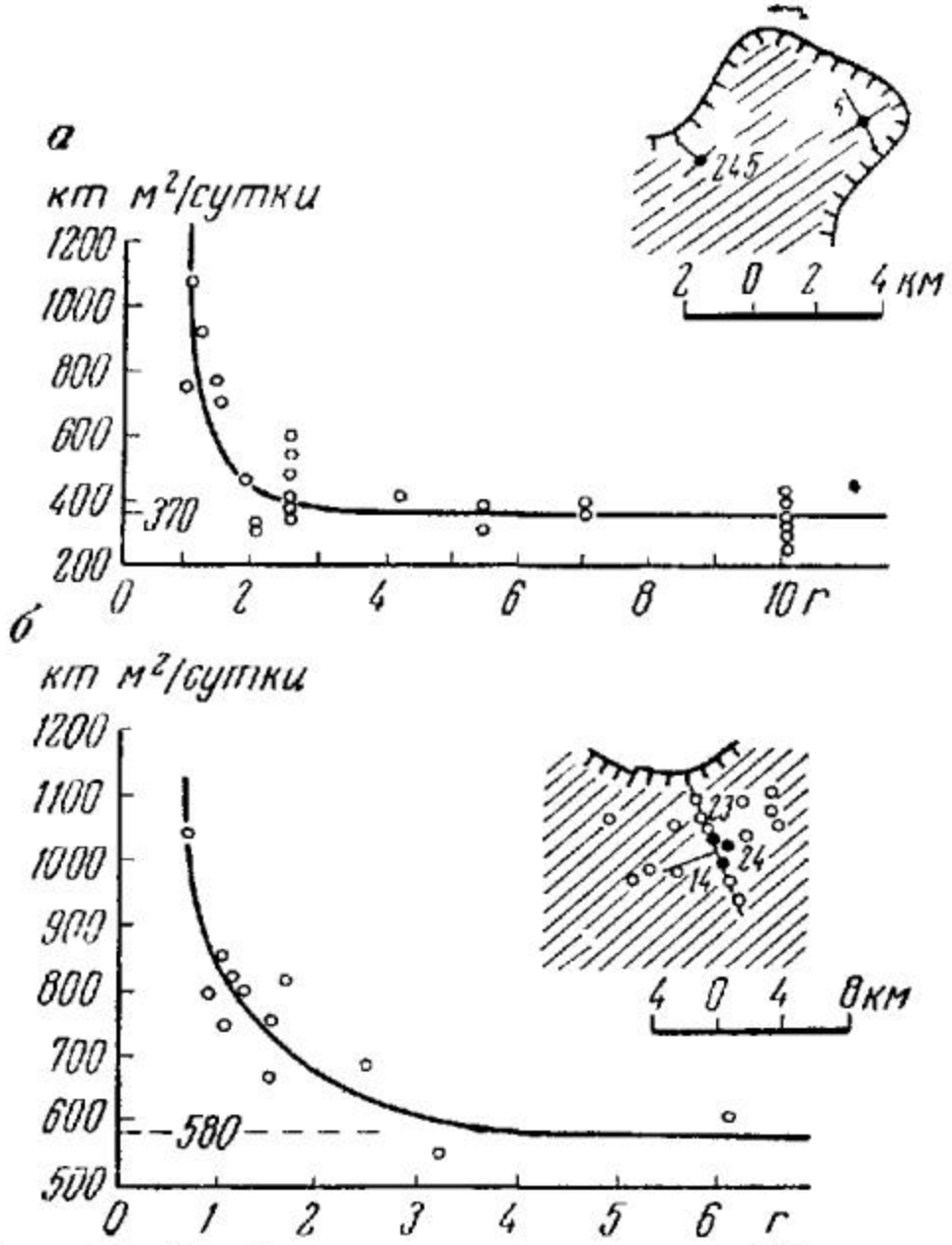



Рис. 15. Графики зависимости коэффициента водопроводимости от относительного положения наблюдательных скважин в неоднородном по водоотдаче пласте при временном прослеживании понижения (по данным Б. М. Зильберштейна, А. В Иванова, 1964 г , Центральные Кызылкумы)

*а* — участок Аймурза, *б* — Бешбулак

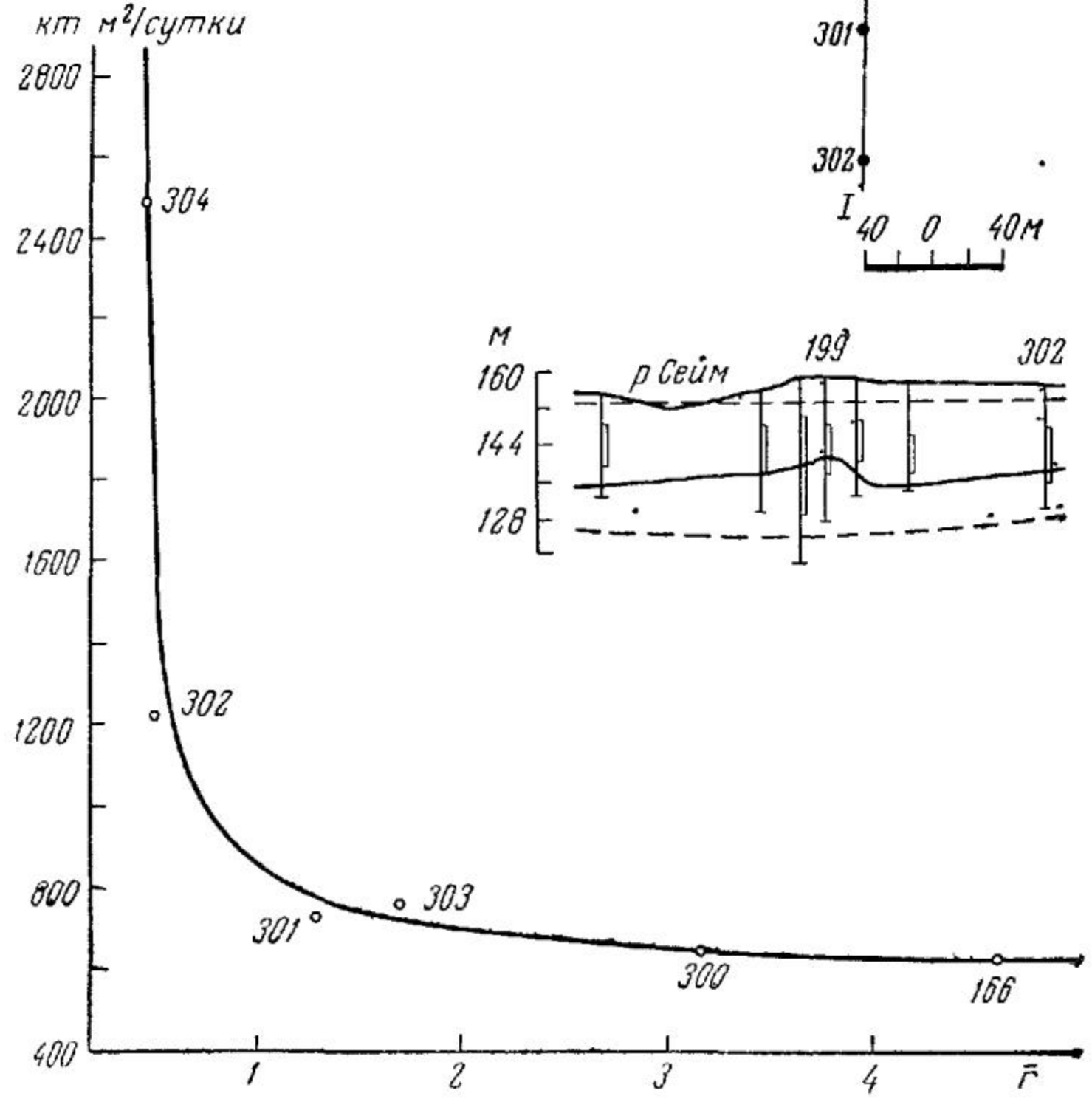
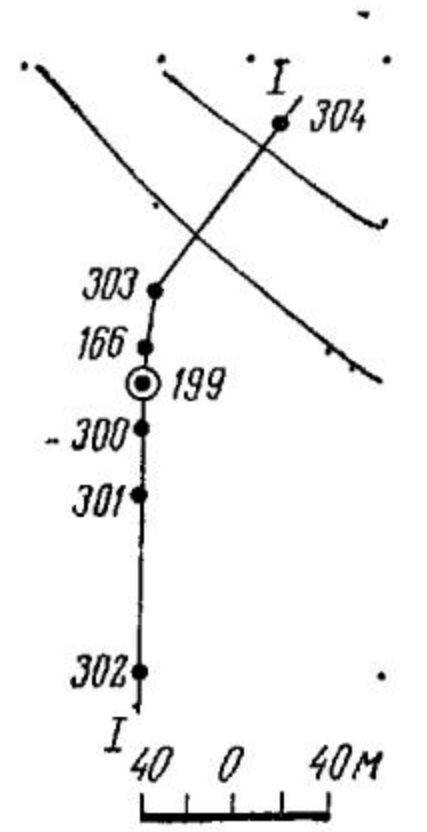



Рис. 16. График зависимости коэффициента водопроводимости от относительного положения наблюдательных скважин на прибрежном участке (по данным А. Саар, 1965 г , долина р. Сеим)



Приведенные примеры подтверждают справедливость предлагаемых критериев.

Таким образом, содержание и последовательность интерпретации опытных данных способом временно́го прослеживания изменения уровня в ограниченных пластах заключается в следующем:

1) прослеживание характера возмущения во времени и выбор приемов временного прослеживания изменения уровня, отвечающих характеру возмущения;

2) построение временных графиков понижения и восстановления и расчет параметров;

3) выбор представительных графиков и представительных участков графиков в соответствии с критерием $m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$;

4) при наличии нескольких наблюдательных скважин — проверка стабильности параметров в зависимости от местоположения скважин.

## Обработка способом площадного прослеживания

Способом площадного прослеживания можно определять действительные коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности в пределах указанных временных и площадных ограничений. Это значит, что площадное прослеживание возможно во II и III зонах на протяжении времени $t_н \leqslant t \leqslant 5t_к$. Следовательно, если для построения площадного графика прослеживания использованы скважины, расположенные в радиусе $m \leqslant r \leqslant 0{,}45l$, а моменты времени для их построения соответствуют указанным временным ограничениям, получение действительных параметров вполне возможно.

При сложном возмущении для обработки способом площадного прослеживания выбирается тот прием из числа приведенных в предыдущей главе, который отвечает конкретному характеру возмущения.

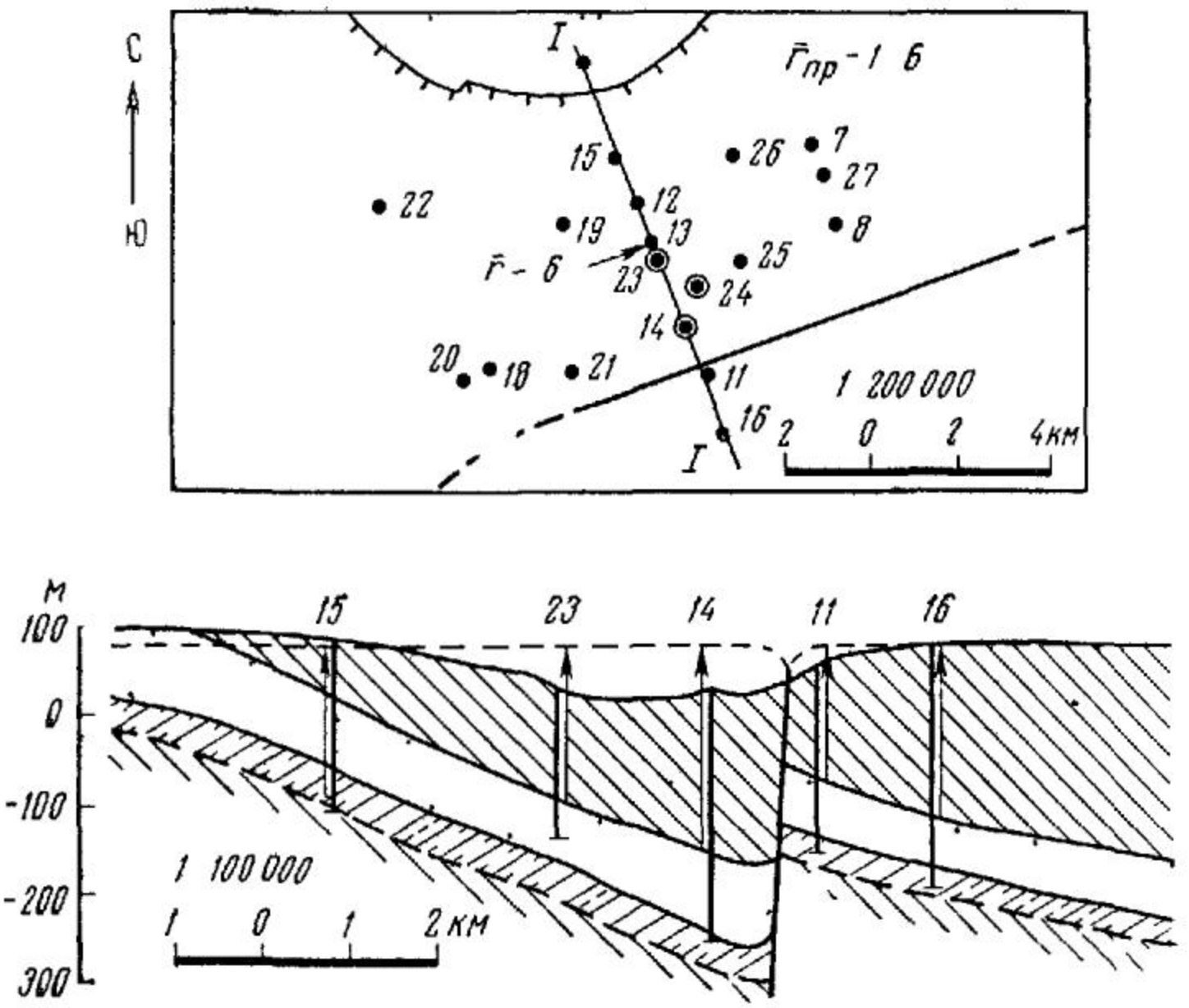
Как видно из рис. 12, область применимости площадного прослеживания (зона III) значительно больше рекомендуемой. Так, например, по внутреннему лучу пригодны для обработки наблюдательные скважины, расположенные от центра возмущения на расстоянии $m \leqslant r \leqslant 0{,}83l$. Такое ограничение можно использовать при детально известной конфигурации границы, когда имеется уверенность в соответствующей ориентировке луча. Поскольку во многих случаях нельзя быть уверенным в этом, предложено более жесткое площадное ограничение, в основу которого положено предельное приведенное расстояние по встречному лучу. Если площадное прослеживание производится в соответствии с площадным ограничением, то коэффициент водопроводимости, как было показано ранее, практически не зависит от избранных моментов времени. Превышение временных ограничений вызывает ошибки только в определении коэффициентов пьезопроводности. При положительных факторах аномальности это приводит к занижению абсолютных значений коэффициента пьезопроводности во времени, при отрицательных — к их завышению.

Диагностирующим признаком этой ошибки является нестабильность кажущихся коэффициентов пьезопроводности во времени. Чтобы избежать этой ошибки, следует производить площадное прослеживание на несколько моментов времени и при параллельности графиков принимать коэффициент пьезопроводности по ранним моментам. Следовательно, в превышении временных ограничений заключается аномальность графиков площадного прослеживания, неэаметная по их форме. Имеются и другие аномалии площадных графиков. Влияние прискважинных помех приводит к деформации начальных участков площадных графиков. Это сказывается в отклонении точек, представляющих наблюдательные скважины, расположенные вблизи возмущений ($r > m$), выше нормальной прямой. Если все скважины располагаются в этой зоне, то коэффициент водопроводимости оказывается заниженным. Следствием превышения площадных ограничений является деформация конечных участков графиков, которая заключается в отклонении точек, находящихся в радиусе $r > 0{,}45l$, выше или ниже нормальной прямой. Причина этих деформаций — отклонение от квазистационарности в сочетании с граничными помехами. Внутренняя плановая мозаичная неоднородность пласта является причиной рассеяния точек на площадном графике. Рассеяние точек графика обусловливает также оборудование наблюдательных скважин при заметной вертикальной анизотропии водоносного горизонта, в частности, к рассеянию приводит размещение фильтров наблюдательных скважин на разных глубинах по отношению к фильтру возмущающей скважины.

Таким образом, форма площадного графика — линейность или рассеяние в расположении точек, параллельность или непараллельность графиков, построенных на разные моменты времени — дает дополнительную информацию о наличии квазистационарности, степени плановой и вертикальной однородности водовмещающих пород. Такая информация контролирует, подтверждает или опровергает самую возможность использования этого способа обработки. Способ площадного прослеживания имеет известное преимущество перед формулой Дюпюи — Тима. Расчет коэффициента водопроводимости (фильтрации) по формуле Дюпюи с использованием двух наблюдательных скважин связан с известной случайностью.

Способ площадного прослеживания имеет существенное преимущество перед способом временного прослеживания большим охватом области возмущения, так как для первого представительными являются наблюдательные скважины в радиусе $r \leqslant 0{,}45l$, а для второго $r \leqslant 0{,}3l$.

Способ площадного прослеживания понижения и восстановления уровня можно проиллюстрировать несколькими примерами. Обратимся к тому же участку Бешбулак, на примере которого показан способ временного прослеживания. На рис. 17 представлены графики площадного прослеживания понижения, построенные с учетом изменения дебита по времени. Они построены на моменты $t = 11{,}9$ и $t = 26{,}8$ суток. Как видно, графики при некотором рассеянии







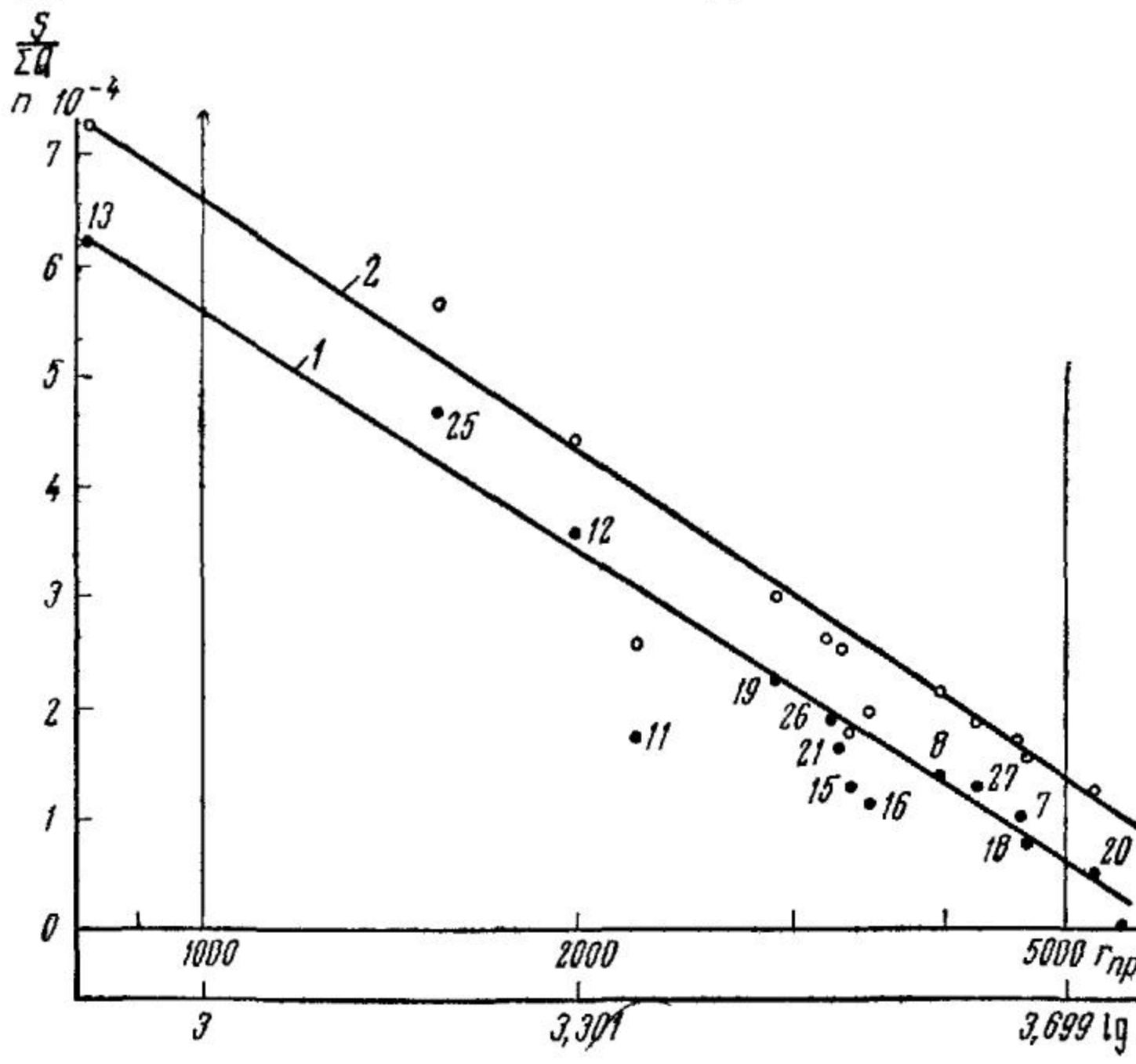



Рис. 17. Характер площадной закономерности приведенного понижения в условиях напорно-безнапорной границы при $\bar{r}_{пр} = 1—6$ (по данным А. В. Иванова, 1964 г., Центральные Кызылкумы).

*1* — при $t = 11{,}9$ суток, $km = 517$ м²/сутки, $a = 1{,}4 \cdot 10^6$ м²/сутки, *2* — при $t = 26{,}8$ суток, $km = 500$ м²/сутки, $a = 1 \cdot 10^6$ м²/сутки

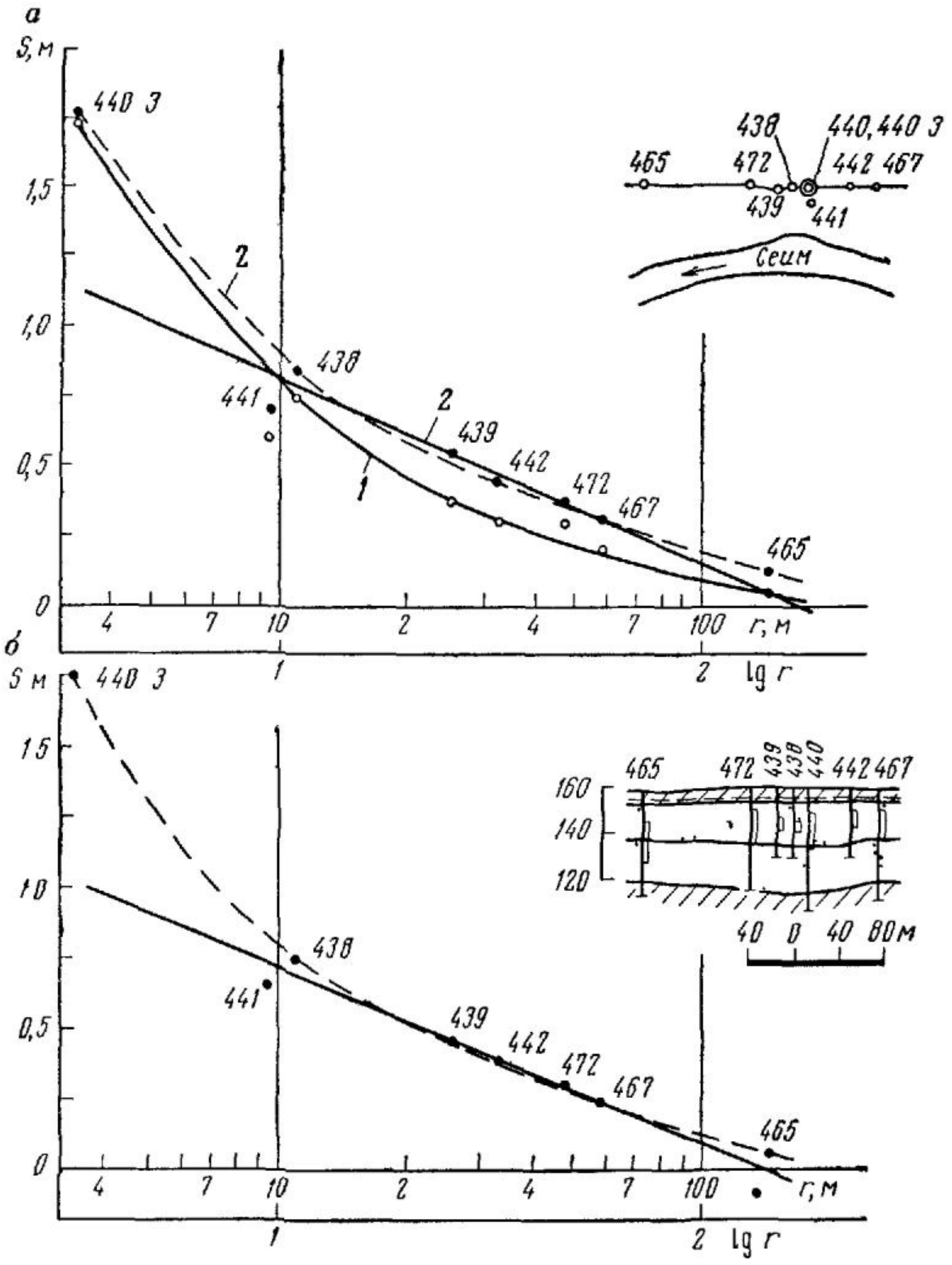
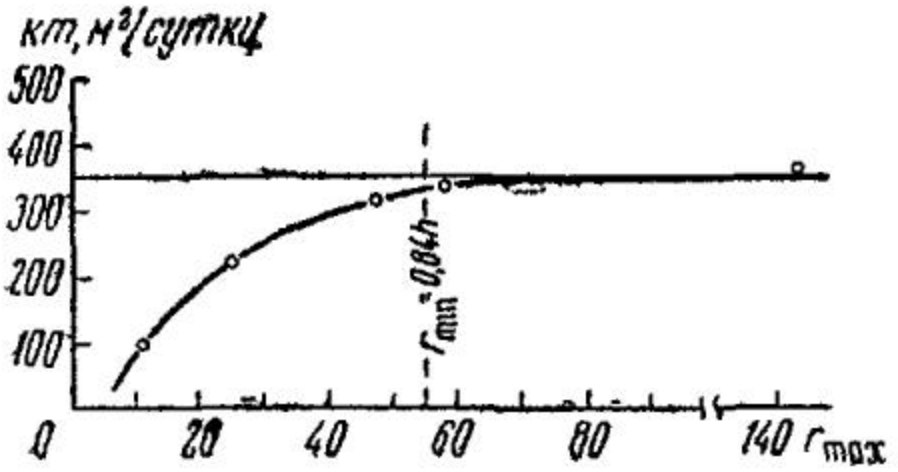



Рис. 18. Графики площадного прослеживания при кустовой откачке 440 (по данным А. М. Прасоловой, 1967 г., долина р. Сейм).

*а — прослеживание понижения уровня, б — прослеживание восстановления уровня при t:* *1* — 10 ч, *2* — 130 ч.

| Наименование опыта | $t$ | $S_1 - S_2$ | $\lg\frac{r_2}{r_1}$ | $C$ | $km = \frac{0{,}366Q}{C}$ | $A$ | $\lg t$ | $\lg a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Понижение | 130 | 0,66 | 1 | 0,66 | 274 | 1,47 | 2,113 | 1,997 | $2{,}4 \cdot 10^2$ |
| Восстановление | 47 | 0,61 | 1 | 0,61 | 297 | 1,82 | 1,672 | 2,308 | $4{,}9 \cdot 10^2$ |

прямолинейны. Наибольшее отклонение от средней прямой отмечается для скважин 11 и 16, расположенных за тектоническим нарушением, а также для скважины 15, оборудованной на нижний менее проницаемый верхнетуронский горизонт. Поэтому их отклонение от осредняющей прямой понятно. Если игнорировать эти скважины при осреднении всей совокупности точек, прямолинейность графиков становится очевидной. Оба графика параллельны, что является доказательством квазистационарности. Рассчитанные по угловому коэффициенту и начальной ординате параметры равны: $km = 517$ м²/сутки, $a = 1{,}4 \times 10^6$ м²/сутки.



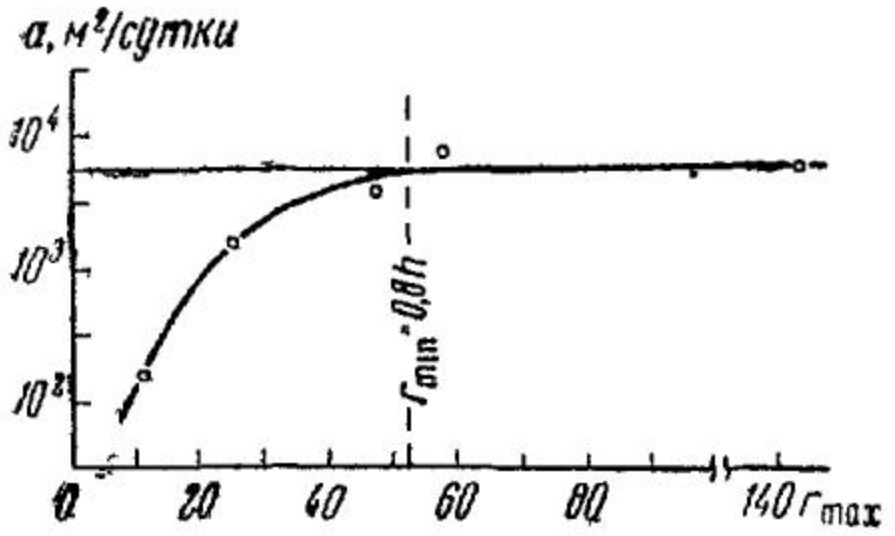




Рис. 19. Влияние несовершенства возмущающей скважины на величину коэффициентов водопроводимости и уровнепроводности, определяемых по двум наблюдательным скважинам при откачке с $Q = 494$ м³/сутки, $h = 32$ м, $l = 44$ м

Следует иметь в виду возможность занижения коэффициента пьезопроводности, поскольку ранний момент времени, на который построен график (11,9 суток), превышает временное ограничение. Например, для скважин в радиусе $r = 1000$ м $t = 1{,}2$ суток. Отсюда временной критерий, позволяющий игнорировать влияние границы на величину пьезопроводности $t < 5t_к$; $5t_к = 6$ суток. Поскольку ранний момент времени $t = 11{,}9$ суток больше временного ограничения, то $a = 1{,}4 \cdot 10^6$ м²/сутки немного занижено. На примере Бешбулакского участка видно, что обработка временного прослеживания была возможна только для двух наблюдательных скважин, попавших в зону II; самая дальняя из них расположена на расстоянии 815 м. При площадном же прослеживании использованы практически все скважины в радиусе 3700 м ($\bar{r} = 1{,}5$—$6$), т. е. способом площадного прослеживания охвачена значительно большая часть водоносного пласта. Но чем больше охват, тем полнее использована опытная информация, следовательно, тем ценнее способ обработки.

На рис. 18 на примере Курского участка (куст 440) показано влияние прискважинных помех на форму площадного графика за счет наблюдательных скважин, попадающих в зону $I$ ($r < m$). Как видно на графиках (рис. 19), это влияние ощутимо на расстоянии $r_{min} = 0{,}8h$. Каждая точка на графике — результат последовательных расчетов по двум наблюдательным скважинам.

Таким образом, содержание и последовательность интерпретации опытных данных способом площадного прослеживания измене-

ния уровня в ограниченных в плане пластах заключается в следующем:

1) выбор приемов площадного прослеживания в соответствии с характером возмущения;

2) построение площадных графиков прослеживания по всей совокупности наблюдательных скважин на три момента времени, один из которых на наиболее ранний момент возмущения;

3) обоснование представительного участка площадных графиков в соответствии с критерием $m \leqslant r \leqslant 0{,}45l$ и расчет параметров;

4) проверка стабильности коэффициента пьезопроводности во времени и обоснование его действительной величины.

## Обработка способом комбинированного прослеживания

Использование способа комбинированного прослеживания предполагает справедливость площадных и временных ограничений, которые рекомендованы для способа временного прослеживания. Следовательно, действительные параметры пластов могут быть определены способом комбинированного прослеживания по наблюдательным скважинам, попадающим в нейтральную зону, т. е. расположенным от центра возмущения в радиусе $m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$. Способом комбинированного прослеживания получают практически те же результаты, что и при временном прослеживании, но он обладает теми преимуществами перед способом временного прослеживания, что во многих случаях облегчает диагностирование представительного участка опытной закономерности. Успех диагностирования этим способом зависит от расположения наблюдательных скважин; могут иметь место следующие случаи:

1) все наблюдательные скважины располагаются в нейтральной зоне ($m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$);

2) все наблюдательные скважины располагаются в зоне заметных (III) и максимальных (IV) деформаций, причем их приведенные расстояния близки между собой ($0{,}3l \leqslant r \leqslant 0{,}45l$);

3) наблюдательные скважины расположены во всех зонах, их приведенные расстояния различны.

В первом случае комбинированные графики всех скважин практически дают один общий прямолинейный график. Тогда параметры определяются по начальным ординатам и угловым коэффициентам общего графика. Совмещение опытной информации различных наблюдательных скважин в общем комбинированном графике свидетельствует в данном случае о том, что наблюдательные скважины действительно находятся в нейтральной зоне и не испытывают граничных помех.

Во втором случае по нескольким наблюдательным скважинам с близкими приведенными расстояниями мы также получаем общий график, но он уже не является представительным, поскольку несет информацию с граничными помехами. Причиной совпадения здесь

является близость приведенных расстояний, а не отсутствие граничных помех.

В третьем случае мы получаем пучок закономерно расходящихся графиков. Отклонение графика дальней скважины от графика ближней скважины пропорционально удаленности последней от центра возмущения. Таким образом, закономерное расхождение графиков с приближением к какой-либо границе будет признаком действия этой границы на опытную закономерность изменения уровня, что само по себе является диагностирующим признаком действующего фактора аномальности.

Действительные параметры можно определить по графику, представляющему ближние скважины, которые отвечают критерию $m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$. Этот график, если другие скважины находятся за пределами нейтральной зоны, будет касательной к графикам по этим скважинам (рис. 20). Таким образом, графики комбинированного прослеживания могут быть полезными в первом и третьем случае. Для контроля полезно проводить комбинированное прослеживание по встречным лучам, это тем более желательно делать при существенных расхождениях между величинами параметров, полученных способами временного и площадного прослеживания.

Высказанные положения иллюстрируются следующими примерами.

На рис. 21 приведены комбинированные графики уже упоминавшегося участка Бешбулак. Графики построены для разных лучей, направление которых показано на схеме. График луча III по скважинам 13 и 12 с $\bar{r} = 2{,}5$ и 6,1 является общим, найденные по нему параметры совпадают с действительными параметрами, определенными способами временного и площадного прослеживания: $km = 572$ м²/сутки, $a = 2 \cdot 10^6$ м²/сутки. График скважины 15 с $\bar{r} = 1{,}5$, находящейся на границе зон III и IV, не имеет с основным графиком общих участков. Комбинированный график второго луча является общим для всех скважин, но коэффициент водопроводимости, определяемый по его угловому коэффициенту, завышен ($km = 763$ м²/сутки), так как все скважины характеризуются приведенными расстояниями $\bar{r} = 0{,}9$—1,5, по величине которых можно судить, что эти скважины располагаются в зоне максимальных деформаций. Совпадение этих графиков объясняется близостью их приведенных расстояний.

На рис. 20 показаны комбинированные графики понижения участка Аймурза. Как видно, в лучах I и II по скважинам с приведенным расстоянием $\bar{r} = 2{,}6$—87 и $\bar{r} = 2{,}1$—87 получены общие графики. Параметры, определенные по этим графикам, практически совпадают с действительными величинами, определенными способом временного прослеживания.

Луч IV состоит из наблюдательных скважин, характеризующихся приведенными расстояниями в диапазоне 1,5—7. Как видно, график представлен веером кривых. Степень отклонения каждого графика от общего начального участка отвечает величине приведенного

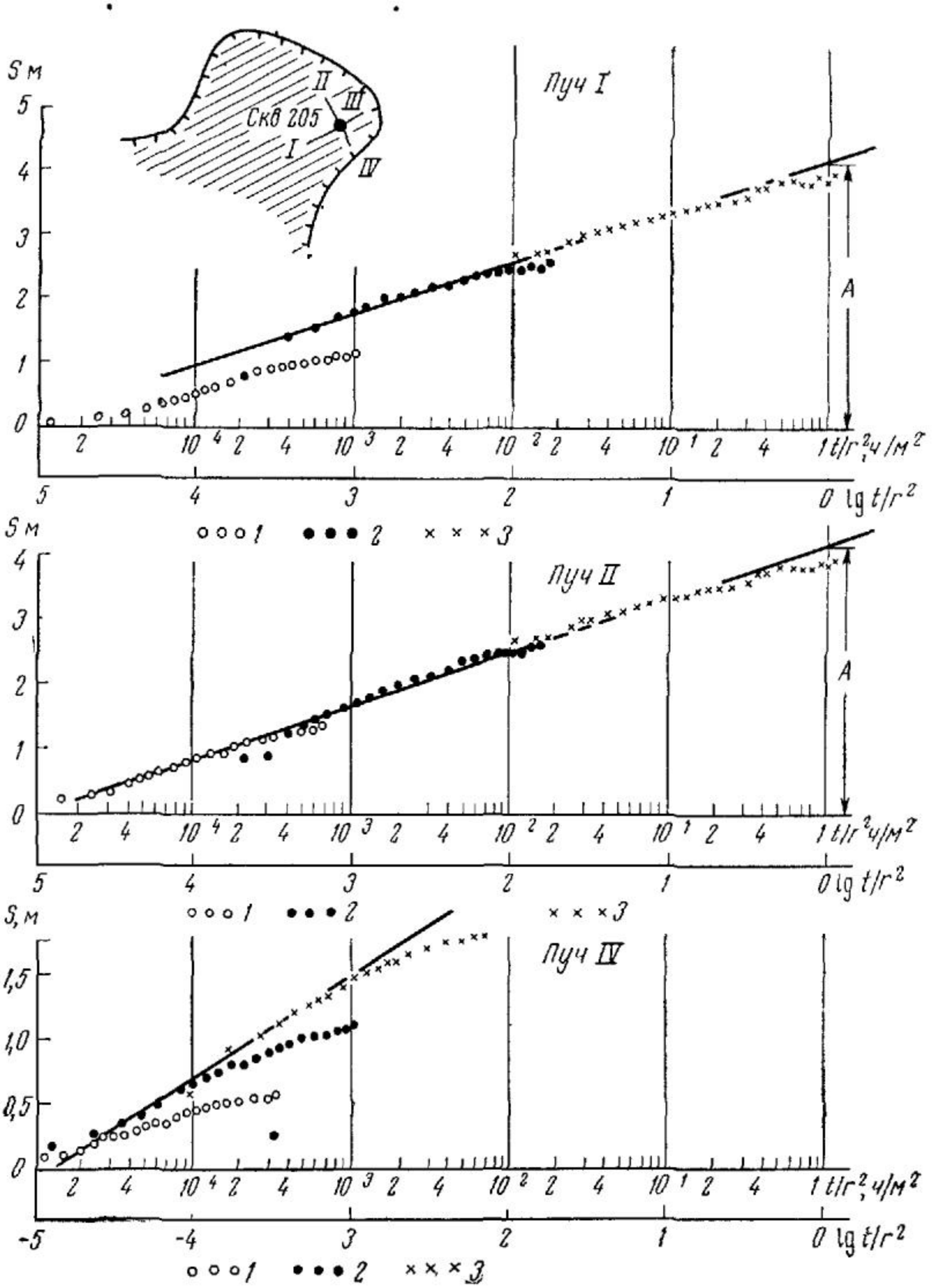



**Рис. 20** Графики комбинированного прослеживания понижения в неоднородном по водоотдаче пласте при откачке из скв. 205 с $Q = 1536$ м³/сутки:

луч I — $km = 360$ м²/сутки, $a = 1{,}9 \cdot 10^6$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстояниях $r$ *1* — 400 м, *2* — 100 м, *3* — 12 м, луч II — $km = 331$ м²/сутки, $a = 8{,}2 \cdot 10^5$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстояниях $r$ *1* — 500 м, *2* — 100 м, *3* — 12 м, луч IV — $km = 351$ м²/сутки, $a = 7{,}6 \cdot 10^5$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстояниях $r$ *1* — 700 м, *2* — 400 м, *3* — 150 м

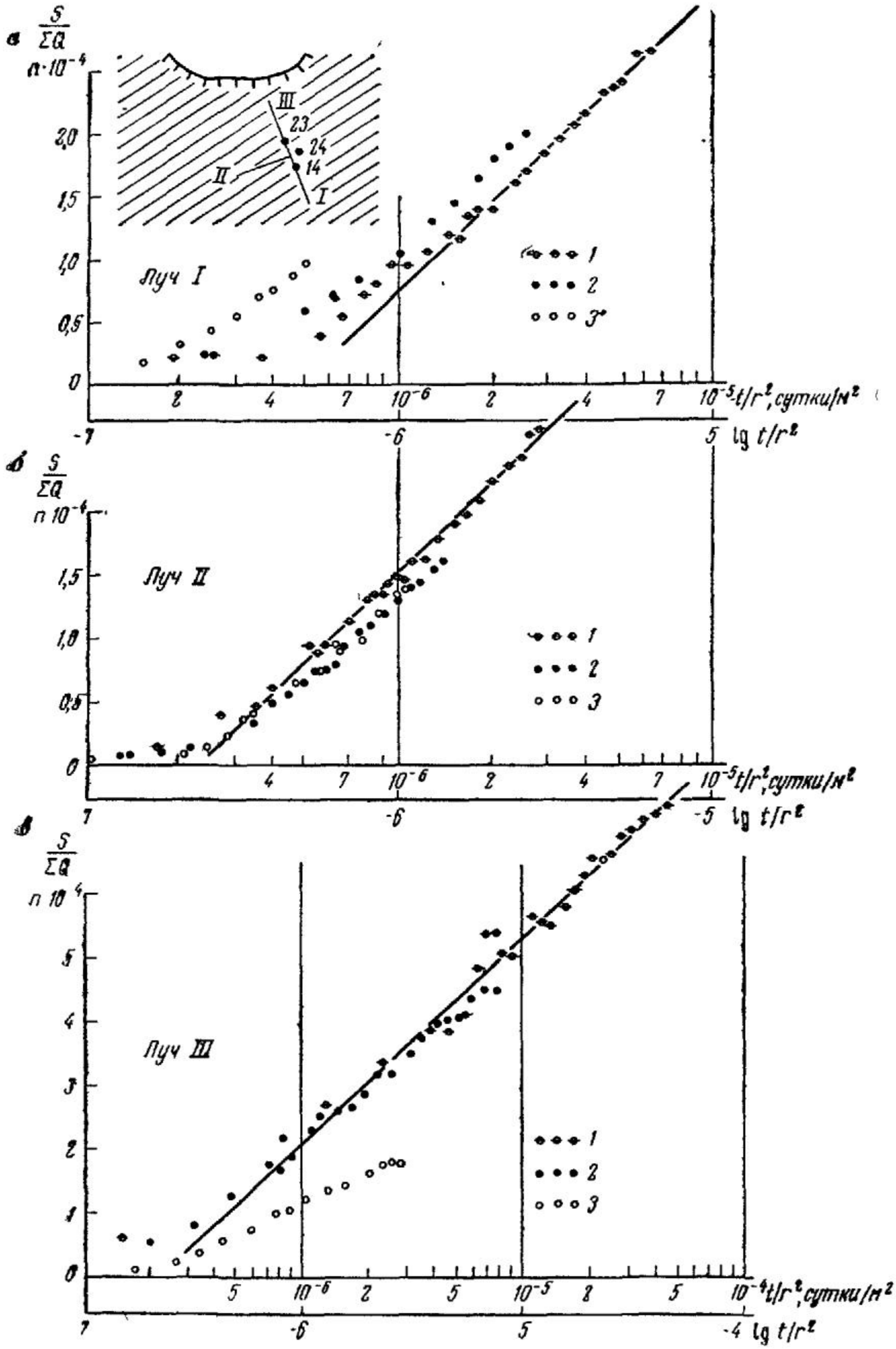



**Рис. 21. Графики комбинированного прослеживания приведенного понижения при групповом выпуске из скв. 14, 23, 24:**

луч I — $km = 763$ м²/сутки, $a = 9{,}1 \cdot 10^5$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстоянии $r_{пр}$: *1* — 2240 м, *2* — 3460 м, *3* — 7600 м; луч II — $km = 763$ м²/сутки, $a = 1{,}9 \cdot 10^6$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстояниях $r_{пр}$: *1* — 3300 м, *2* — 4700 м, *3* — 5300 м; луч III — $km = 572$ м²/сутки, $a = 2 \cdot 10^6$ м²/сутки, наблюдательные скважины на расстояниях $r_{пр}$: *1* — 815 м, *2* — 2000 м, *3* — 3350 м

расстояния. По этой форме графика можно заключить, что фактором аномальности в данном случае может быть только граница неоднородности пласта по водоотдаче, от которой (границы) производился отсчет приведенного расстояния.

Таким образом, содержание и последовательность обработки опытных данных способом комбинированного прослеживания в ограниченных пластах заключается в следующем:

1) выбор приемов комбинированного прослеживания в соответствии с характером возмущения;

2) построение комбинированных графиков по лучам характерных направлений;

3) обоснование представительных участков комбинированных графиков в соответствии с критерием $m \leqslant r \leqslant 0{,}3l$ и расчет параметров.

Сравнение трех способов обработки опытной информации, трех модификаций метода Джейкоба, обнаруживает существенное преимущество способа площадного прослеживания перед двумя остальными. Это преимущество заключается в том, что способ площадного прослеживания достаточно представительно обеспечивает бо́льший охват области возмущения ($m \leqslant r \leqslant 0{,}45l$); меньше зависит от характера возмущения; представляет возможность контроля по форме и взаимному положению графиков без привлечения дополнительных аналитических критериев; обеспечивает максимальную степень свертывания информации. В связи с этим естественно возникает вопрос: если способ площадного прослеживания достаточно объективен, почему бы не предпочесть его всем остальным, отказавшись от последних? Очевидно, это нецелесообразно по следующим причинам. Графики площадного прослеживания могут быть также аномальными по ряду причин. Объективные результаты при площадном прослеживании могут быть получены только по некоторой совокупности точек. Но если точка временного графика — это результат одного замера, точка на площадном графике представляет одну наблюдательную скважину, т. е. цена одной точки при этих двух способах несопоставима. Таким образом, увеличение количества точек на площадном графике ведет к нежелательному удорожанию опыта.

Вследствие сложности природных условий и приближенности их математических моделей интерпретация опытной информации является достаточно сложной, требующей многостороннего контроля достоверности расчетных параметров. Одним из наиболее эффективных способов является контроль проверкой стабильности параметров по способам обработки. Для этого, как минимум, необходима обработка двумя способами — временным и площадным прослеживанием изменения уровня. Практическое совпадение величин, рассчитанных разными способами, является доказательством их достоверности, а систематические расхождения определяют направления для дальнейшего поиска.

## Особенности сложного характера возмущения в ограниченных пластах

Специфика влияния сложного характера возмущения на опытные закономерности изменения уровня связана с эффектом многократности возмущений, асинхронных во времени или разобщенных по площади. Возмущением является пуск откачки, ее остановка, подключение новой скважины, переход на новое понижение и т. д. Действующие границы пласта, реагируя на каждое возмущение, обусловливают серию последовательных во времени аномалий формы временных графиков прослеживания. Поиск представительного участка на таких графиках чрезвычайно усложняется, следствием чего являются ошибки квалификации разного знака и величины.

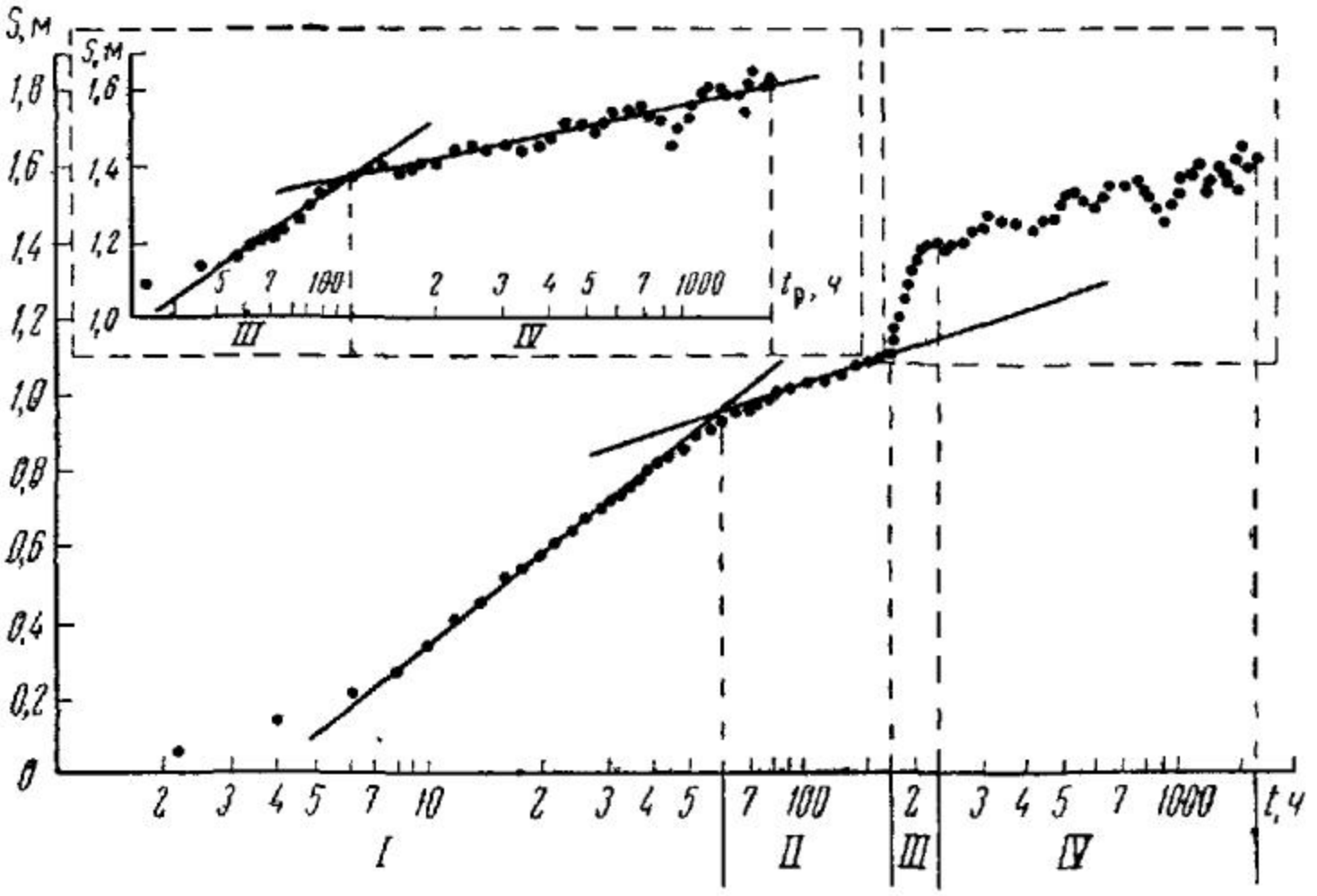



Рис. 22. Интерпретация графика прослеживания понижения при разновременной групповой откачке у границы пласта

Разберем в качестве примера случай разновременного включения двух возмущающих скважин. Обработка производится способом временного прослеживания понижения. Пример относится к участку Аймурза, куст 205/210 (рис. 22, 23). Фактор положительной аномальности здесь — действие границы с безнапорной зоной. Характер возмущения, связанный с разновременным включением возмущающих скважин, иллюстрируется рис. 22. Как видно, имеется три перелома и четыре участка на графике прослеживания: участок I представляет опытную закономерность понижения практически без влияния граничных помех (скв. 213 $\bar{r} = 2{,}3$); участок II отражает влияние границы при первом возмущении (возмущающая скв. 205); участок III, отвечающий второму возмущению, отражает скачкообразное возрастание дебита и «наследство» первого возмущения вместе с «наследством» границы и, наконец, участок IV отражает

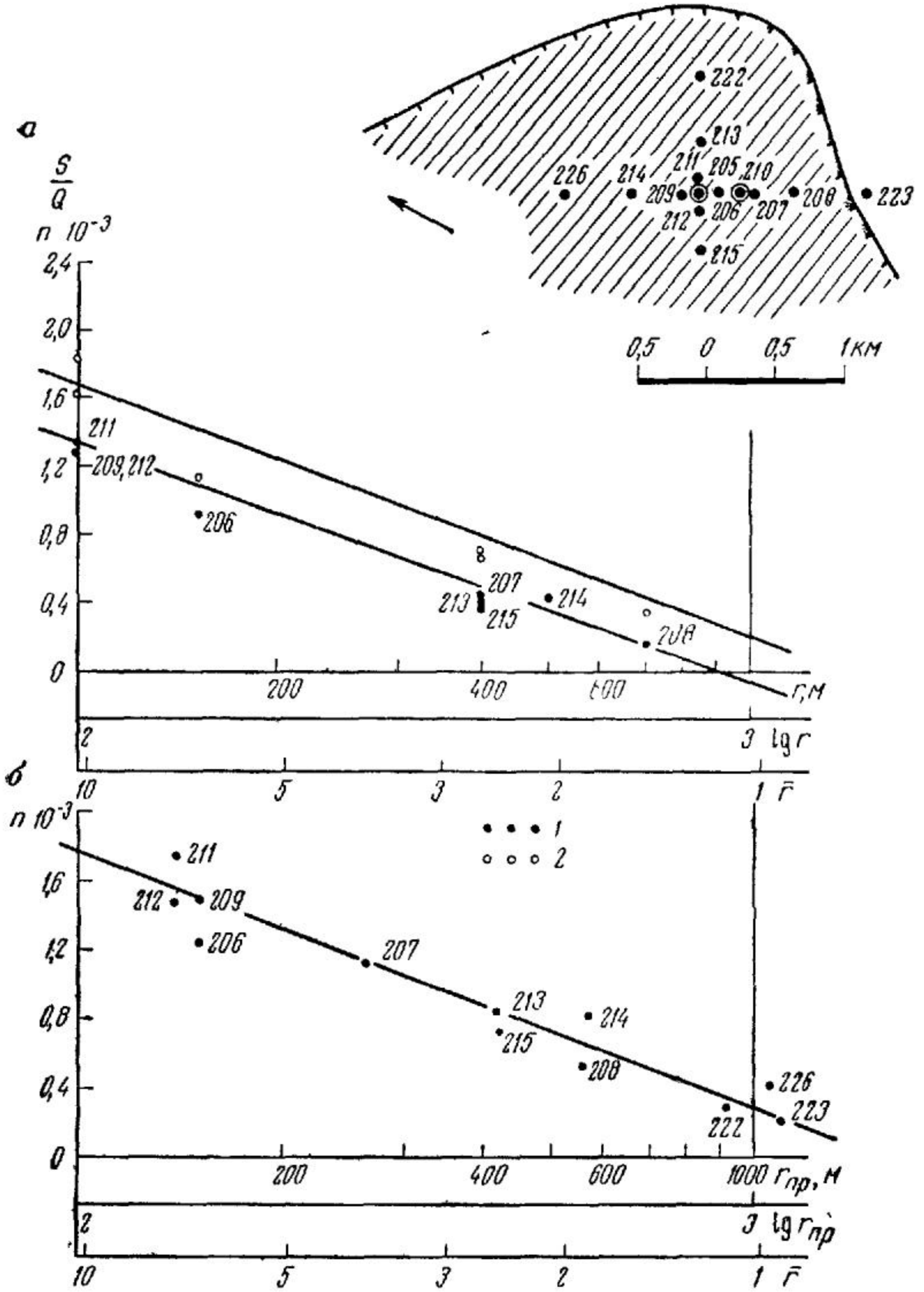



Рис. 23. Графики площадного прослеживания приведенного понижения:
*а* — при возмущающей скважине 205 при *t*: *1* — 20 ч, *2* — 100 ч; *б* — при возмущающих скважинах 205, 210, $t_{пр} = 1020$ ч

| $t$ | $\left(\frac{S_1}{Q}\right)_1 - \left(\frac{S_2}{Q}\right)_2$ | $\lg\frac{r_2}{r_1}$ | $C$ | $m = \frac{0{,}366}{C}$ | $A$ | $\lg a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ | 1 | $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ | 261 | $4{,}14 \cdot 10^{-3}$ | 4,259 | $4{,}4 \cdot 10^{5}$ |
| 100 | $1{,}47 \cdot 10^{-3}$ | 1 | $1{,}47 \cdot 10^{-3}$ | 249 | $4{,}62 \cdot 10^{-3}$ | 3,93 | $2{,}0 \cdot 10^{5}$ |
| 1020 | $1{,}47 \cdot 10^{-3}$ | 1 | $1{,}47 \cdot 10^{-3}$ | 249 | $4{,}69 \cdot 10^{-3}$ | 3,032 | $2{,}6 \cdot 10^{4}$ |

действие всех предыдущих факторов плюс действие границы при втором возмущении. Если построить график временного прослеживания для групповой откачки (на последней ступени) $S$ — lg $t_{пр}$, то форма его ничем не отличается от формы временного графика при одиночном возмущении (возмущающая скв. 205, участок I и III). Но в последнем случае начальный участок временнного графика представляет действительный параметр $km$ = 358 м²/сутки, а в первом — кажущийся, заключающий «наследство» границы от первого возмущения $km$ = 630 м²/сутки. Ошибка квалификации для анализируемой наблюдательной скв. 213 составит 75%.

В случаях, подобных описанному, действительный коэффициент водопроводимости можно определить способом площадного прослеживания приведенного понижения. Как видно на рис. 23, площадные графики при одиночном и групповом возмущении параллельны, и рассчитанные по ним коэффициенты водопроводимости практически равны. При этом могут возникать ошибки в коэффициентах пьезопроводности за счет превышения моментов площадного прослеживания за временные ограничения. Описанная ошибка квалификации возникает тогда, когда аномалия приходится на момент времени до включения очередной возмущающей скважины. Поскольку время начала влияния границ пласта трудно предвидеть заранее, то практически такая ошибка весьма вероятна. Следовательно, скачкообразный характер возмущения при опробовании ограниченных пластов является нежелательным. Если же это обстоятельство не зависит от исследователя, то при обработке, когда имеются систематические расхождения, следует принимать результаты временного прослеживания первого возмущения и коэффициент водопроводимости по площадному прослеживанию как по одиночной, так и по групповой части опыта.

Определенной спецификой отличаются закономерности восстановления уровня в ограниченных пластах. Определение основных параметров прослеживанием восстановления уровня обычно производится методом Хорнера, который, строго говоря, применим к условиям неограниченного водоносного пласта. Этот метод заключается в прослеживании остаточного понижения после остановки откачки. Остаточное понижение представляется, как разность между экстраполируемым понижением откачки на время, превышающее продолжительность откачки, и повышением уровня от гипотетического налива. По существу метод заключается в поиске истинного уровня отсчета повышений аналитическим путем, или в учете «наследства» откачки. В ограниченных пластах, когда имеет место аномалия закономерности понижения, определяемый введением сложного времени $\frac{T+t}{t}$ уровень отсчета повышений не является истинным. Для получения истинного уровня отсчета необходимо экстраполировать конечный участок закономерности понижения, что не всегда возможно. Игнорирование факта «наследства» границ при временном прослеживании приводит к ошибкам, знак и величина которых за-

висят от природы действующих границ и относительного местоположения наблюдательных скважин. При положительных факторах аномальности будут иметь место ошибки в сторону занижения коэффициента водопроводимости, при отрицательных (действие непроницаемых и слабопроницаемых) — в сторону завышения. Механизм ошибки за счет неучета «наследства» границ можно иллюстрировать рис. 24, на котором аналитическая экстраполяция понижения заменяется более наглядной графической. Фактором положительной аномальности является здесь граница неоднородности по водоотдаче.

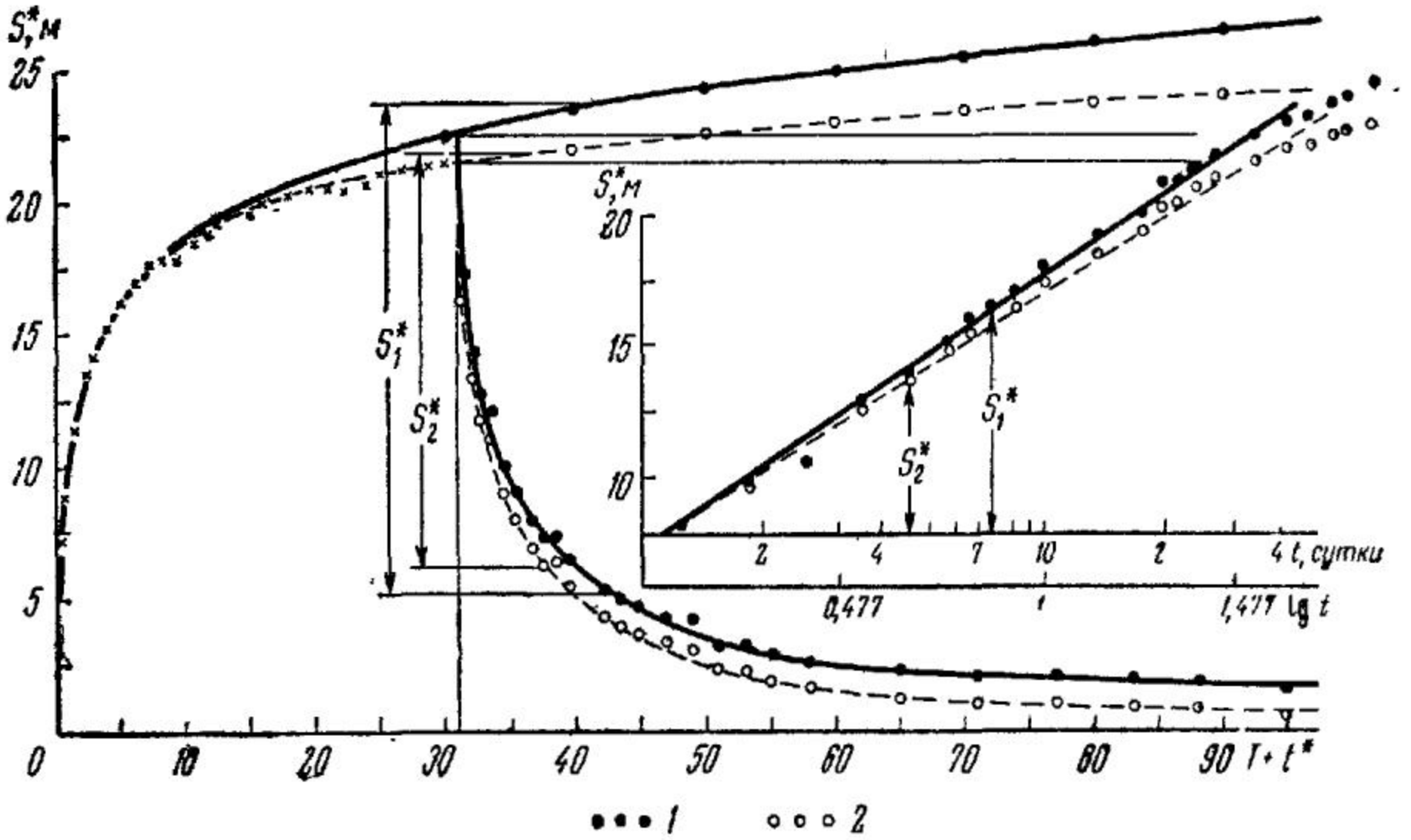



**Рис. 24. Схема к определению параметров прослеживанием восстановления уровня в ограниченном пласте:**

*1* — нормальный график $S = f(T + t)$; *2* — аномальный график $S = f(T + t)$

Условия участка ясны из рис. 17. Как видно, отсчет повышений от графика, экстраполируемого от начального участка закономерности понижения, а не от аномального участка, дает увеличение крутизны временного графика прослеживания и занижение коэффициента водопроводимости на 9%.

Величина ошибки коэффициента водопроводимости, определяемого методом Хорнера, при положительных факторах аномальности (при прочих равных условиях) возрастает по мере увеличения степени аномальности. Если положительная аномалия приводит к стабилизации, обработку восстановления следует производить методом Джейкоба с использованием повышений уровня. Величина ошибки при действии отрицательных факторов аномальности также возрастает с увеличением степени аномальности. Количественный анализ ошибки при действии непроницаемой границы, выполненный А. В. Ивановым в зависимости от длительности и местоположения

возмущения и наблюдательных скважин, показывает, что эта ошибка может достигать заметных величин при кратковременных откачках и сложной конфигурации действующих границ пласта [56].

Таким образом, на основании приведенных рассуждений можно заключить, что с точки зрения интерпретируемости опытная информация, получаемая на стадии понижения и восстановления при опробовании ограниченных пластов, не является равноценной. Вместе с тем необходимо отметить, что практически во многих реальных случаях различия между параметрами, определяемыми при прослеживании понижения и восстановления, как правило, не превышают ошибок первичной обработки (25%). Это обстоятельство, несмотря на очевидную сложность интерпретации опытных данных, получаемых при восстановлении, не позволяет отказываться от использования этих данных.

Суммируя все сказанное относительно обработки опытной информации в условиях аномальности, связанной с ограниченностью водоносных пластов в плане, мы приходим к следующим выводам.

1. Для обработки опытных данных при опробовании ограниченных напорных пластов можно пользоваться методом Джейкоба при следующих ограничениях: а) для способа временного и комбинированного прослеживания используются наблюдательные скважины, расположенные в радиусе не более $0{,}3l$ от возмущающей скважины; б) для способа площадного прослеживания используются наблюдательные скважины в радиусе не более $0{,}45l$. При данных ограничениях погрешность в определении коэффициента водопроводимости за счет игнорирования влияния границ пласта не превышает 10%.

2. В связи с тем что опытная информация, получаемая на стадиях понижения и восстановления, в вышеуказанных условиях не является равноценной, основной для определения расчетных параметров в ограниченных пластах считается информация, получаемая на стадии понижения.

Глава 5

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ БЕЗНАПОРНЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Метод Джейкоба, строго говоря, применим для обработки результатов опробования напорных пластов, мощность и водоотдача которых остаются постоянными в продолжение опытных откачек. Безнапорные водоносные горизонты отличаются от напорных тем, что их мощность при понижении уровня является величиной переменной. Однако фактом изменения мощности можно пренебрегать в тех случаях, когда величина понижения к концу откачки не превышает 20% начальной мощности водоносного горизонта [10]. При бо́льшем понижении обработка опытных данных производится на основе формулы Джейкоба в координатах $(2H - S)\,S - \lg t$. После такой подстановки определение основных параметров, коэффициента водопроводимости и уровнепроводности можно производить способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания величины $(2H - S)\,S$, т. е. по угловым коэффициентам и начальным ординатам временных, площадных и комбинированных графиков прослеживания. При сложном характере возмущения вместо времени и расстояния используются их приведенные величины ($r_{пр}$, $t_{пр}$), расчет которых производится так, как это рекомендовано для напорных пластов.

Расчетные формулы для коэффициента уровнепроводности останутся по виду теми же, что и для напорного пласта, а в формулах для коэффициента фильтрации, в отличие от формулы для коэффициента водопроводимости, численные коэффициенты увеличиваются в два раза. Обработка данных восстановления уровня может производиться аналогичным образом, т. е. способами временно́го, площадно́го и комбинированного прослеживания величины $(2H - S^*)\,S^*$, где $S^*$ — повышение от динамического уровня в конце откачки.

Если изменение мощности является единственным отличием безнапорного водоносного горизонта от напорного, то при сложном возмущении и влиянии граничных факторов аномальности для интерпретации графиков прослеживания применимы все критерии, рекомендованные для напорных условий.

В реальных условиях закономерности изменения уровня при откачках из безнапорных горизонтов бывают простыми и сложными. Простые закономерности хорошо согласуются с уравнением Тейса — Джейкоба практически во всем диапазоне времени опыта, за исключением начального участка в пределах контрольного времени. При простых закономерностях, при отсутствии влияния граничных факторов аномальности графики временно́го, площадного и комбинированного прослеживания прямолинейны, а определенные по ним гидрогеологические параметры практически совпадают. Интерпретация простых закономерностей производится с помощью вышеперечисленных приемов.

Однако в целом ряде случаев в безнапорных водоносных горизонтах (см. главу 1) происходят деформации графиков изменения уровня во времени в связи с проявлением эффекта Болтона, вызванного изменением действующей водоотдачи и, в частности, влиянием капиллярных сил [154, 138]. Как уже отмечалось, на графике $S$ — lg $t$ при наличии эффекта Болтона в общем случае выделяется три периода. Первый период соответствует уравнению Тейса при упругой водоотдаче, второй (период ложностационарного режима) характеризуется резким замедлением темпа снижения уровней и, наконец, третий отвечает уравнению Тейса — Джейкоба при гравитационной водоотдаче. Таким образом, отличие простых закономерностей изменения уровня при откачках от сложных заключается в том, что квазистационарный участок, описываемый уравнением Тейса — Джейкоба, в простых случаях формируется практически во всем диапазоне опыта, а при сложных закономерностях появляется с запаздыванием. Следовательно, имея сложные закономерности, можно говорить о проявлении эффекта Болтона в том смысле, что участок, отвечающий уравнению Тейса и переходящий далее в квазистационарный участок, формируется с видимым запаздыванием. В связи с тем что закономерности изменения уровня при откачках из-за переменности водоотдачи носят сложный характер, для обработки опытных данных предложен эталонный метод Болтона [154], подробный анализ и усовершенствование которого выполнены в работах [138, 156, 152, 160].

Использование этого метода на практике обнаруживает его чрезвычайную условность, причем нередки случаи, когда опытным кривым либо вообще не находится эталона, либо при относительно удовлетворительном совпадении опытных и эталонных кривых получаются нереальные величины параметров. Аналогичные суждения имеются и в иностранной литературе [152]. Это обстоятельство заставляет возвратиться к методу Джейкоба, как наиболее простому и надежному в практическом отношении. Для обоснования этого вывода можно привести следующие соображения: во-первых, во многих случаях при опробовании безнапорных горизонтов эффект Болтона практически не проявляется; во-вторых, при наличии эффекта Болтона участки графика $S$ — lg $t$, представительные для обработки методом Джейкоба, наблюдаются в пределах времени,

достижимого практикуемой продолжительностью опытных откачек. Анализ опытных данных показывает, что величина запаздывания находится в пределах 1—8 суток. Рассмотрим ряд примеров, иллю-

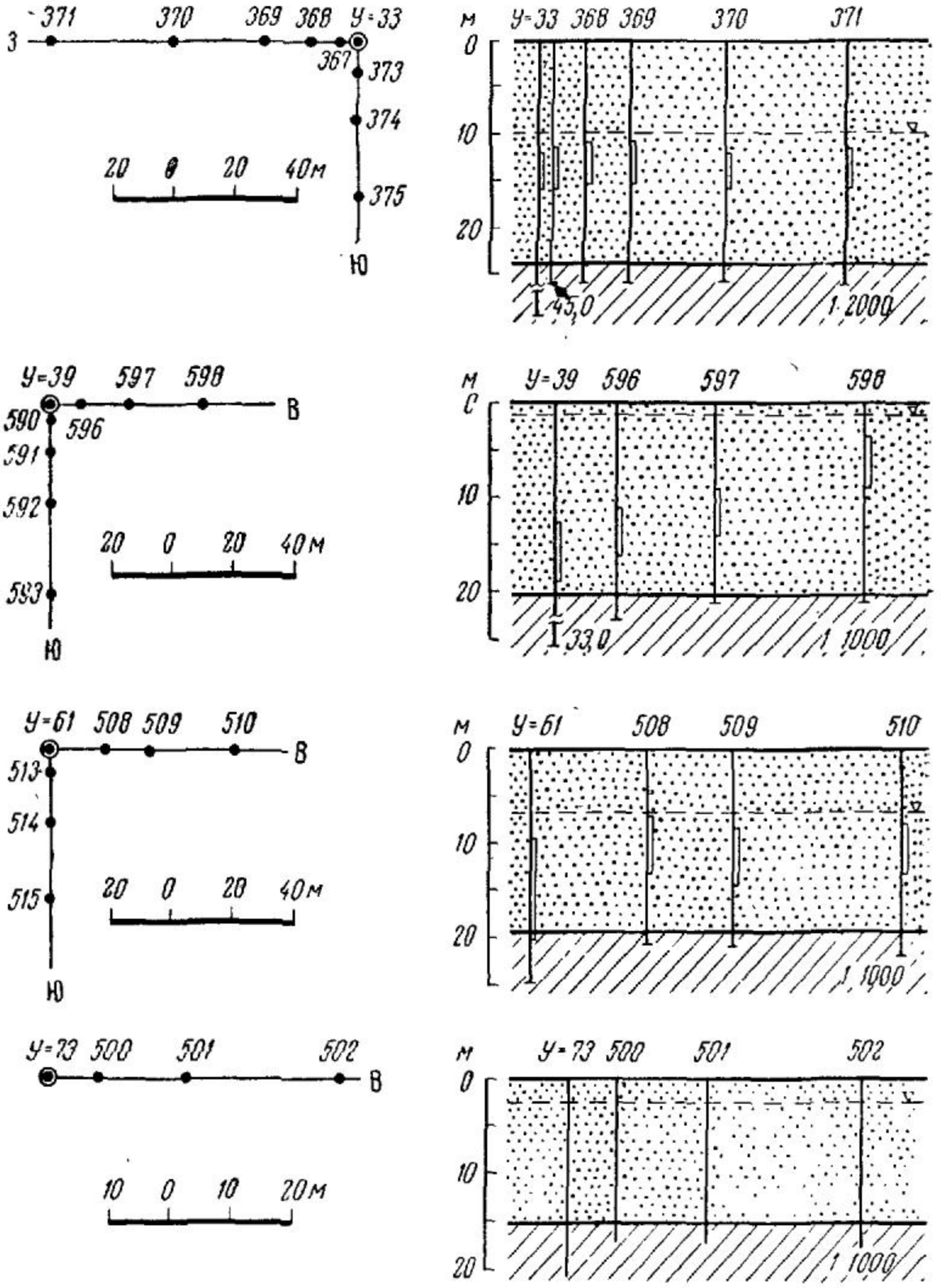



Рис. 25. Схемы и разрезы опытных кустов (по данным Э. К. Кима, 1969 г., Устюрт)

стрирующих характер реальных графиков прослеживания и возможность их обработки методом Джейкоба. Для примеров использовано Самское месторождение в Казахстане.

Самское месторождение представляет собой обширный песчаный массив площадью 600 км². Водоносный горизонт при горизонтальном

водоупоре чрезвычайно прост и однороден. Он опробован одиночными и кустовыми откачками. Схемы опытных кустов показаны на рис. 25. По выборке из 137 значений найден коэффициент вариации по мощности $w_h = 9{,}7\%$ и коэффициенту водопроводимости по данным одиночных откачек $W_{km} = 50\%$, что характеризует водоносный горизонт как однородный. В пределах опробуемой площади отсутствуют какие-либо иные факторы аномальности, что позволяет проследить эффект Болтона в «чистом» виде. Обратимся к данным кустового опробования. На рис. 26, 27 приведены графики комбинированного прослеживания понижения. Как видно, из четырех опытных кустов при полной аналогии гидрогеологических условий достаточно четкое представление о проявлении эффекта Болтона можно получить только по двум — 73 и 39, где конечные участки выходят на общую касательную. В двух других графики всех наблюдательных скважин выходят на одну прямую без запаздывания, обнаруживая справедливость линейно-логарифмической зависимости, т. е. закономерности, описываемой формулой Тейса — Джейкоба.

Выход всех графиков на общую прямую происходит через 100—120 ч на кусте 73 и через 80—180 ч на кусте 39, т. е. в интервале времени (3,3—7,5 суток), вполне доступном для современной практики опробования. Расчетные параметры по сложным графикам определены по угловым коэффициентам и начальным ординатам общих прямых, проведенных по конечным участкам. Получены следующие величины по данным комбинированного прослеживания понижения (табл. 8).

Таблица 8

| № куста | Коэффициенты | | |
|---|---|---|---|
| | фильтрации $K$, м/сутки | уровнепроводности $a$, м²/сутки | водоотдачи $\mu$ |
| 33 | 7,2 | $4{,}7 \cdot 10^2$ | 0,20 |
| 39 | 8 6 | $8{,}5 \cdot 10^2$ | 0.19 |
| 61 | 8,5 | $6{,}3 \cdot 10^2$ | 0,18 |
| 73 | 5,0 | $3{,}1 \cdot 10^2$ | 0,24 |
| Среднеарифметическое | 7,3 | $5{,}6 \cdot 10^2$ | 0,2 |

Определим параметры способом площадного прослеживания сразу по всем кустам, для чего используем приведенную ординату $\frac{(2H-S)S}{Q}$. Площадное прослеживание сделано на два момента времени, относящихся к конечному участку комбинированных графиков (см. рис. 3). Получены прямолинейные и параллельные во времени площадные графики *.

* Как показано в работе [138], определение водопроводимости по графикам $S - \lg r$ или по формуле Дюпюи возможно и на моменты времени, отвечающие ложностационарному режиму.

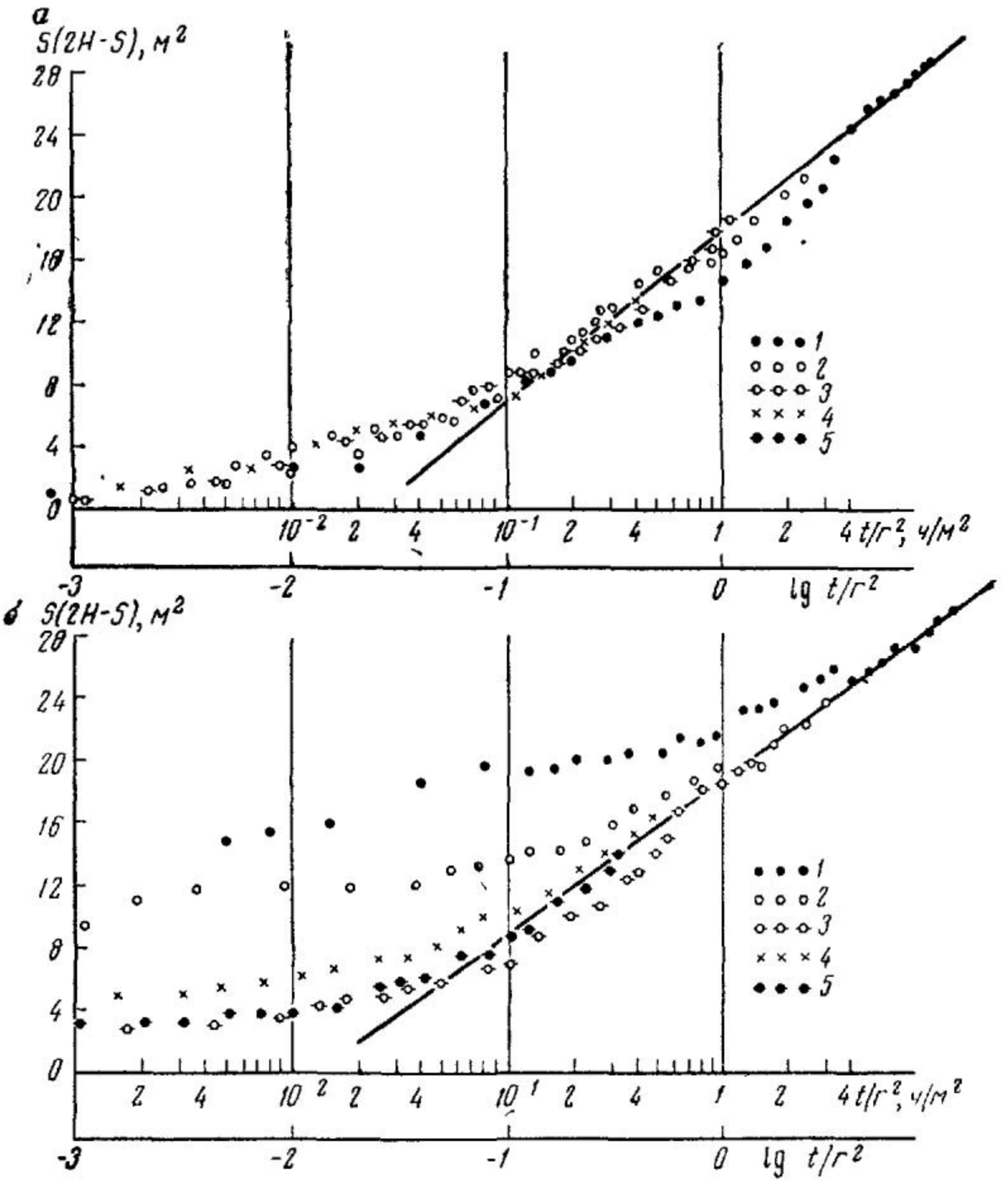



Рис. 26. Графики комбинированного прослеживания понижения:

*а* — при откачке из куста 33, наблюдательные скважины на расстояниях *r*: *1* — 5 м, *2* — 10 м, *3* — 15 м, *4* — 25 м, *5* — 30 м; *б* — при откачке из куста 39, наблюдательные скважины на расстояниях *r*: *1* — 5 м, *2* — 10 м, *3* — 15 м, *4* — 26 м, *5* — 31 м.

| № куста | Q, м³/сутки | C | K, м/сутки | A | lg a | a, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 33 | 216 | 11,0 | 7,2 | 18,1 | 1,29 | $4{,}7 \cdot 10^2$ |
| 39 | 234 | 10,0 | 8,57 | 19,0 | 1,55 | $8{,}5 \cdot 10^2$ |

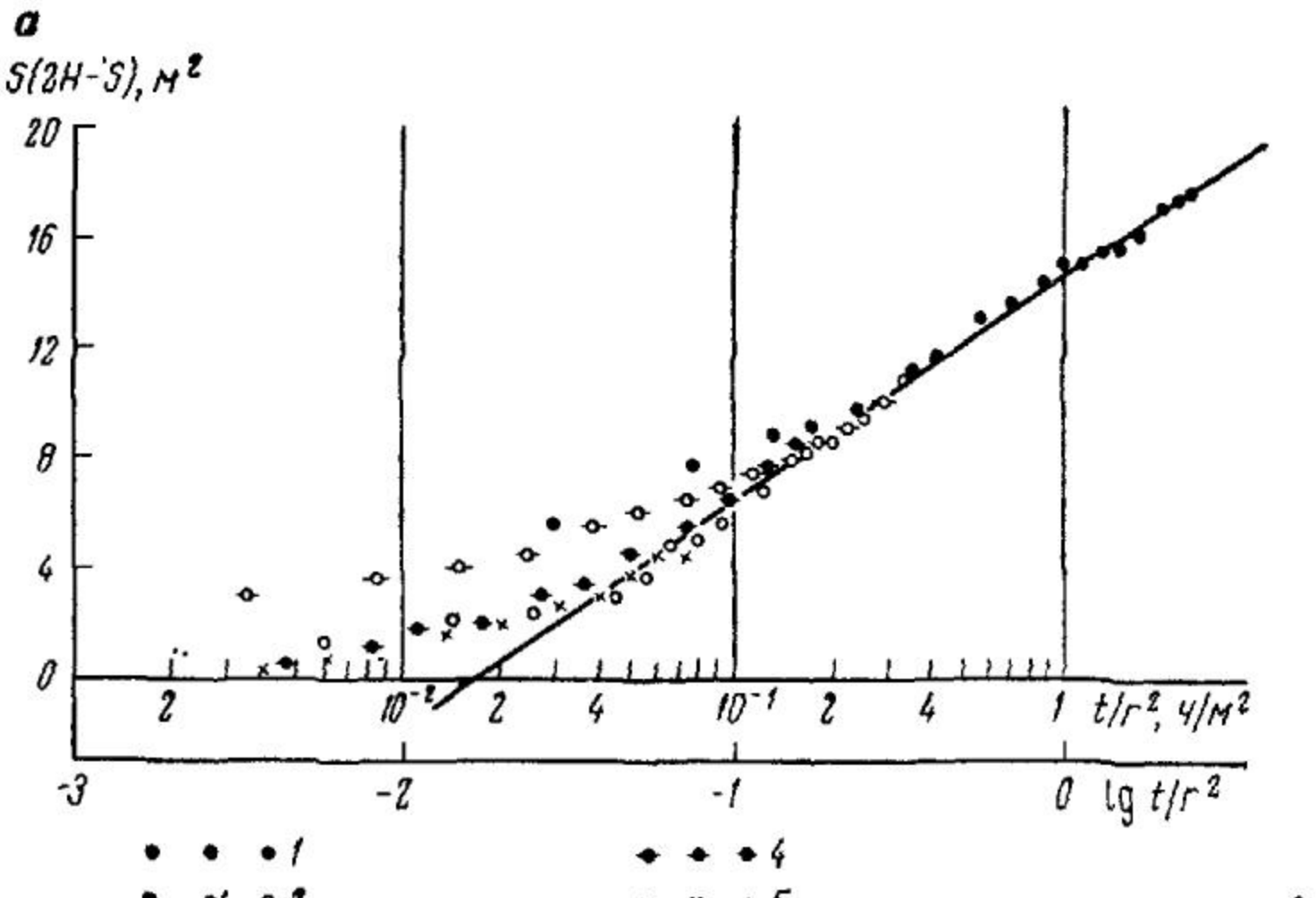



**Рис. 27. Графики комбинированного прослеживания понижения:**

*а* — при откачке из куста 61, наблюдательные скважины на расстояниях *r*: *1* — 8 м, *2* — 19 м, *3* — 24 м, *4* — 33 м, *5* — 48 м; б — при откачке из куста 73, наблюдательные скважины на расстояниях *r*: *1* — 8 м, *2* — 23 м, *3* — 47 м

| № куста | *Q*, м³/сутки | *C* | *K*, м/сутки | *A* | *a*, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|
| 61 | 192 | 8,3 | 8,47 | 14,7 | $6{,}31 \cdot 10^2$ |
| 73 | 193 | 14,0 | 5,04 | 20,4 | $3{,}09 \cdot 10^2$ |

Сравним результаты площадного и комбинированного прослеживания (табл. 9).

Таблица 9

| Способ обработки | Коэффициенты | | |
|---|---|---|---|
| | фильтрации K, м/сутки | уровнепроводности $a$, м²/сутки | водоотдачи $\mu$ |
| $S(2H-S)-\lg\frac{t}{r^2}$ | 7,3 | $5{,}6\cdot10^2$ | 0,2 |
| $\frac{S(2H-S)}{Q}-\lg r$ | 7,7 | $6{,}5\cdot10^2$ | 0,17 |

Как видно из табл. 9, результаты практически совпадают. Определения производились и способом временно́го прослеживания. Величины параметров, полученные по конечным участкам временных графиков ($K = 7{,}5$ м/сутки, $a = 3{,}7\cdot10^2$ м²/сутки, $\mu = 0{,}19$), близки к результатам обработки первыми двумя способами. Однако интерпретация временны́х графиков по каждой наблюдательной скважине в отдельности менее убедительна, чем интерпретация с помощью комбинированного графика сразу для всех скважин куста. В первом случае мы имеем дело со слишком короткими конечными участками, во втором — рисовка расчетной прямой, общей для всех графиков, более убедительна.

Таким образом, стабильность параметров по способам обработки является доказательством того, что использованные участки опытной закономерности аппроксимируются уравнением Тейса — Джейкоба. Следовательно, параметры, рассчитанные по методу Джейкоба для случаев с эффектом Болтона и без него, близкие по абсолютным величинам по всем кустам, можно квалифицировать как действительные.

Анализируемый пример свидетельствует о том, что проявление эффекта Болтона при аналогичном строении опытных участков не всегда проявляется в опытных закономерностях изменения уровня. Обработка опытных данных методом Джейкоба возможна и при сложных закономерностях. Для этого целесообразно пользоваться графиками комбинированного прослеживания. Расчетным участком комбинированного графика является асимптотическая полулогарифмическая прямая, общая для графиков по всем наблюдательным скважинам. Для контроля следует пользоваться способом площадного прослеживания на моменты времени, отвечающие выходу комбинированных графиков на общую асимптоту. Доказательством достоверности определяемых параметров является практическая сходимость величин, рассчитанных обоими способами.

Интерпретация результатов опробования безнапорного водоносного горизонта еще более усложняется при сочетании эффекта Болтона с влиянием граничных факторов аномальности. В зависимости

от времени запаздывания конечного представительного участка и от относительного местоположения наблюдательных скважин влияние границ может приходиться на время, превышающее продолжительность конечного участка, совпадающее с ним или опережающее его. В последнем случае, при «раннем» влиянии границ происходит деформация всей опытной кривой, маскирующая присутствие эффекта Болтона. При более «позднем» влиянии границ происходит изменение угла наклона конечного участка, затрудняющее количественную интерпретацию. Указанные явления диагностируемы: в случае «раннего» и «позднего» влияния деформированные графики отдельных наблюдательных скважин не выходят на общую асимптоту. При откачках вблизи водотоков ложностационарный участок может быть ошибочно диагностирован как участок стабилизации от влияния границы постоянного напора. Сочетание эффекта Болтона с влиянием граничного фактора в интервале времени асимптотического участка видно на примере Черемшанского участка (куст 100). Действующей границей водоносного горизонта здесь является река, расположенная в 90 м от возмущающей скважины (рис. 28). Присутствие эффекта Болтона обнаруживается по форме временных и комбинированных графиков. Время запаздывания асимптотического участка равно в среднем одним суткам. Откачкой в течение 744 ч достигнута стабилизация уровня за счет контура постоянного напора.

Влияние реки (выполаживающее) на форму графиков прослеживания в диапазоне асимптотических участков, приводит к тому, что выход отдельных графиков на общую асимптоту, как это имело место в предыдущем примере (кусты 73, 39), не наблюдается. Игнорируя факт возможного влияния реки, определим коэффициенты водопроводимости по временным графикам, используя для этого участки, предшествующие стабилизации. По наблюдательным скважинам, наиболее близким к возмущающим, получены значения $kh = 706 — 728$ м²/сутки. Определяем коэффициент водопроводимости способом площадного прослеживания на моменты, отвечающие ложной и действительной стабилизации (см. рис. 28). Очевидно, последние величины можно квалифицировать как действительные параметры ($kh = 462$ м²/сутки). Таким образом, ошибка за счет игнорирования деформации конечных участков вследствие влияния реки составит около 40%. В данном примере факт сочетания эффекта Болтона с граничным фактором аномальности диагностируется по форме комбинированных графиков и поддается контролю способом площадного прослеживания. Характерно, что прослеживание восстановления не обнаруживает эффекта Болтона, а величина коэффициента водопроводимости, рассчитанная этим способом, близка к действительной (рис. 29).

Определенный интерес представляет вопрос об использовании информации, получаемой при восстановлении уровня после откачки, при которой фиксировался эффект Болтона. Анализ опытных данных, которыми мы располагали (10 опытных кустов), не обнаруживает эффект Болтона в закономерностях восстановления уровня даже

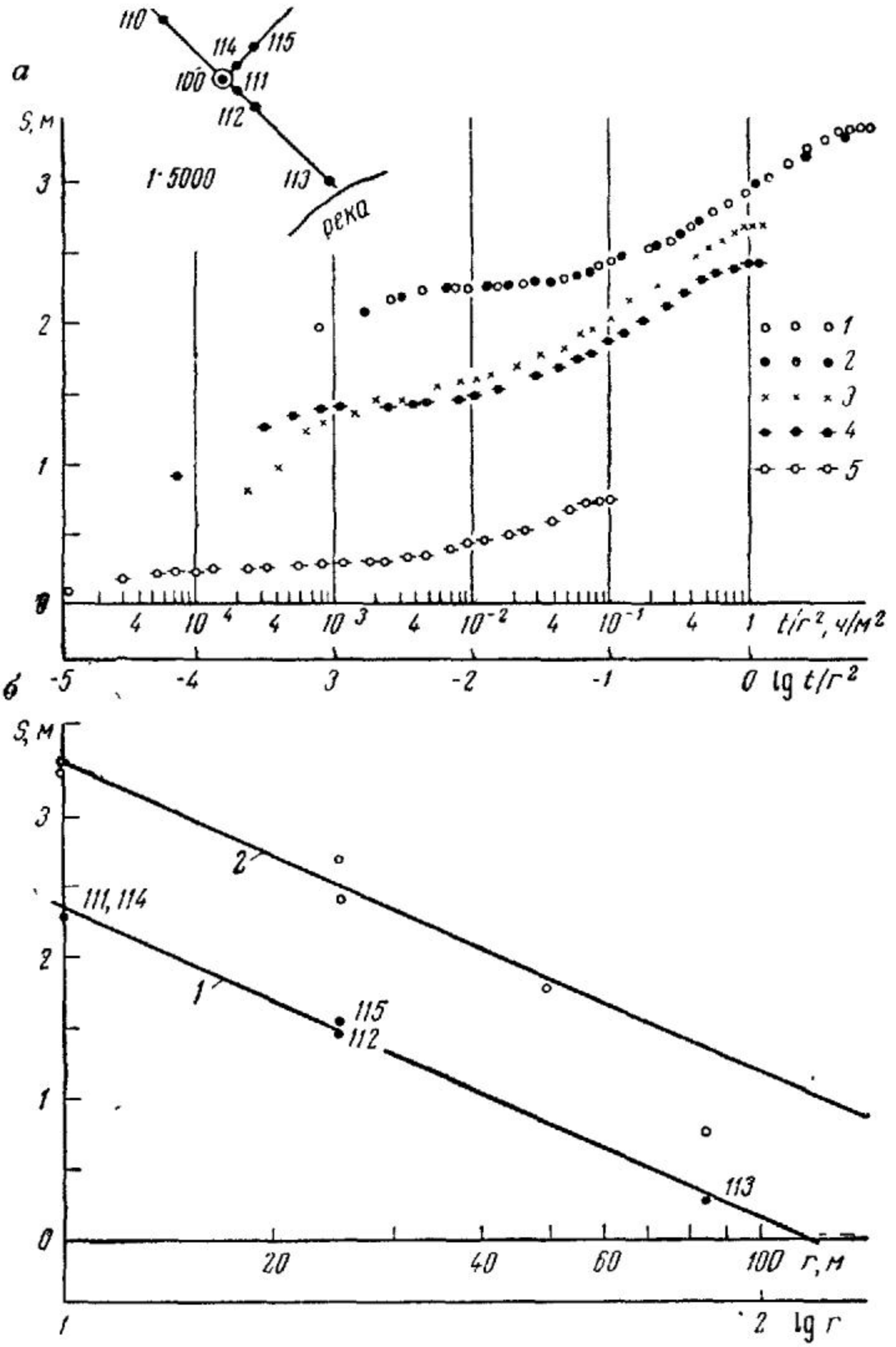



Рис. 28. Графики прослеживания понижения уровня (по данным Р. И. Ларченко, 1970 г.):

*а* — комбинированного прослеживания при расстояниях $r$ наблюдательных скважин: *1* — 10 м, *2* — 10 м, *3* — 25 м, *4* — 25 м, *5* — 85 м; *б* — площадного прослеживания на моменты $t$: *1* — 3 ч, *2* — 672 ч

| Способ обработки | № прямой | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *а* $S-\lg\frac{t}{r^2}$ | 1 | 2780 | 0,68 | 748 | 2,94 | $2{,}4\cdot10^5$ |
| | 2 | 2780 | 0,68 | 748 | 2,74 | $1{,}1\cdot10^5$ |
| *б* $S-\lg r$ | 1 | 2780 | 2,21 | 461 | 4,57 | $4{,}9\cdot10^4$ |
| | 2 | 2780 | 2,20 | 462 | 5,6 | $2{,}0\cdot10^3$ |

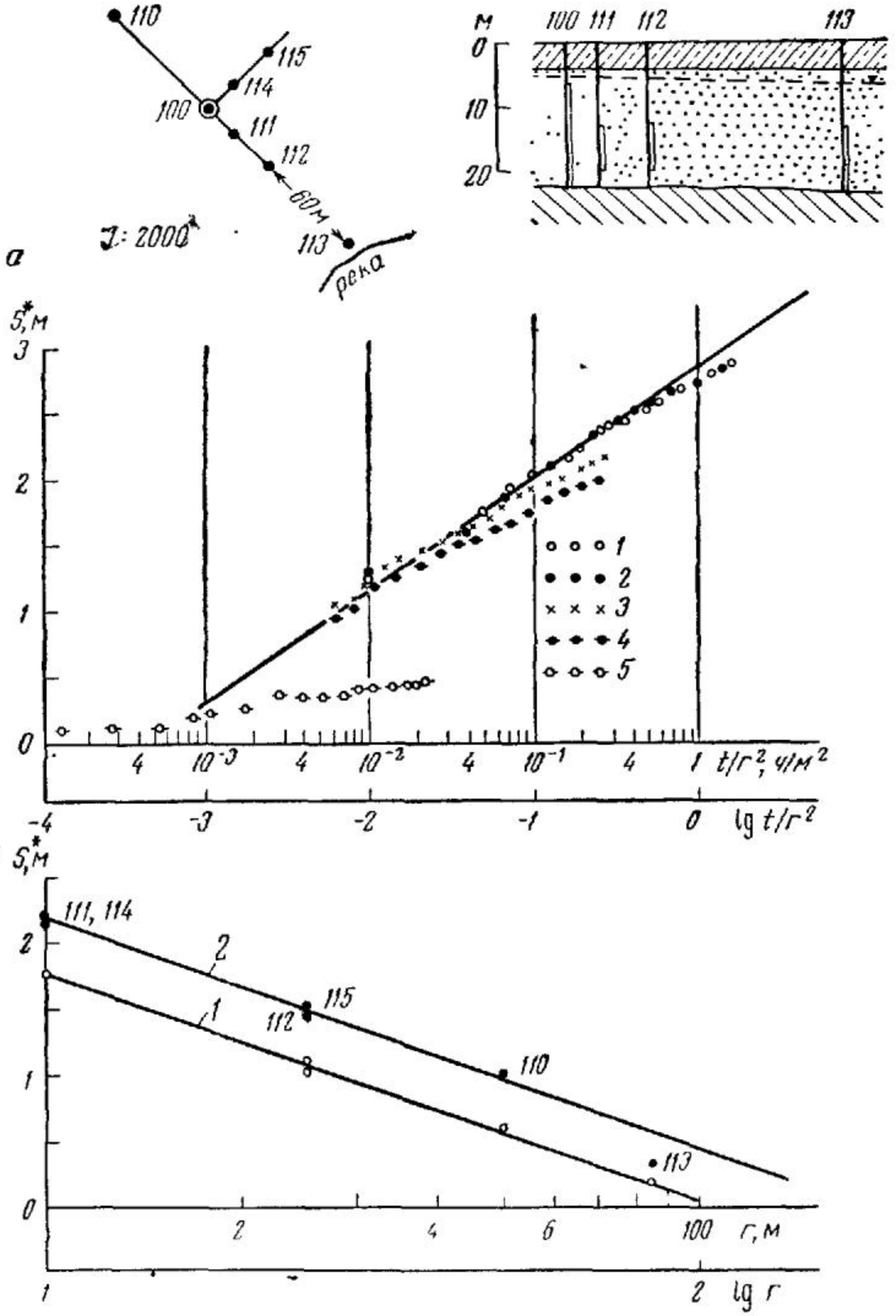



Рис. 29. Графики прослеживания восстановления уровня (по данным Р. И. Ларченко, 1970 г.):

*а* — комбинированного прослеживания при опробовании прибрежного участка, расстояния $r$ наблюдательных скважин: *1* — 10 м, *2* — 10 м, *3* — 25 м, *4* — 25 м, *5* — 85 м; *б* — площадного прослеживания на моменты $t$: *1* — 5 ч, *2* — 17 ч

| Способ обработки | № прямой | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| а | | | | | | |
| $S^* - \lg \frac{t}{r^2}$ | 1 | 2780 | 0,85 | 599 | 2,87 | $2{,}6 \cdot 10^4$ |
| б | 1 | 2780 | 1,7 | 590 | 3,45 | $2{,}5 \cdot 10^4$ |
| $S^* - \lg r$ | 2 | 2780 | 1,725 | 600 | 3,9 | $2{,}1 \cdot 10^4$ |

тогда, когда он имел место в закономерностях понижения, причем параметры, *определявшиеся способами прослеживания восстановления*, оказались близкими к действительным величинам. На этом основании мы делаем вывод о том, что результаты прослеживания понижения и восстановления, являясь качественно неравноценными, могут давать, однако, близкие в практическом отношении величины гидрогеологических параметров.

На основе современных представлений о механизме фильтрации в безнапорных водоносных горизонтах и по результатам анализа опытных данных можно сделать следующие выводы.

1. Временные закономерности изменения уровня, получаемые при опробовании безнапорных водоносных горизонтов, имеют участки, описываемые уравнением Тейса — Джейкоба. Последние, являясь асимптотическими, формируются с запаздыванием от начала опыта по сравнению с закономерностями, получаемыми при опробовании напорных горизонтов. Величина запаздывания изменяется от нескольких минут до нескольких суток. Она зависит, по существу, от неизвестных параметров и поэтому является величиной практически непрогнозируемой, но достижимой практикуемой продолжительностью откачек.

2. В зависимости от величины запаздывания асимптотических квазистационарных участков все случаи интерпретации подразделяются на простые, при которых запаздывание не наблюдается или незначительно, и сложные, при которых запаздывание значительно. Поскольку асимптотические квазистационарные участки в однородных пластах практически достижимы даже в сложных случаях, при постановке опытных работ необходимо стремиться к выявлению участков, аппроксимирующихся уравнением Тейса — Джейкоба. Ориентируясь на вероятность сложного случая, необходимо регулировать продолжительность опыта с помощью оперативной документации.

3. При наличии асимптотических квазистационарных участков обработка опытных данных может производиться методом Джейкоба. Способы и приемы обработки будут зависеть от вида получаемых закономерностей изменения уровня: при отсутствии эффекта Болтона и понижении меньше 20% начальной мощности водоносного горизонта обработка производится так же, как и для напорных пластов; при отсутствии эффекта Болтона, а также при наличии его и понижении больше 20% начальной мощности обработка производится с использованием сложной ординаты $(2H - S)\,S$. Обработка опытных данных в присутствии эффекта Болтона связана с необходимостью поиска представительного расчетного участка.

4. Для обработки сложных случаев рекомендуются способы комбинированного и площадного прослеживания изменения уровня. Признаком представительности асимптотических участков на комбинированных графиках является выход графиков нескольких наблюдательных скважин на общую асимптоту. Влияние граничных факторов аномальности выражается в том, что асимптотические участки

не достигают общего графика или отклоняются от него с увеличением времени. Площадное прослеживание производится на моменты времени, попадающие на конечные участки получаемых закономерностей изменения уровня и в пределы общего комбинированного графика. Близость значений параметров, рассчитанных площадным и комбинированным способами, является доказательством того, что избранный участок графика аппроксимируется уравнением Тейса — Джейкоба, а полученные на его основе гидрогеологические параметры являются действительными величинами.

5. Игнорирование сложного характера закономерностей изменения уровня при опробовании безнапорных водоносных горизонтов является причиной систематических ошибок при определении основных расчетных параметров способами временного и площадного прослеживания. Наиболее вероятными такие ошибки становятся при сочетании эффекта Болтона с граничными факторами аномальности. Ошибки могут достигать в этих случаях многократных величин и, как правило, в сторону завышения коэффициента водопроводимости. Эти ошибки можно устранять применением указанных способов и приемов обработки и целенаправленной постановкой опытных откачек.

Глава 6

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ТРЕЩИННЫХ И ТРЕЩИННО-КАРСТОВЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

Трещиноватые и закарстованные породы, как правило, характеризуются существенной неоднородностью и анизотропией фильтрационных и емкостных свойств. Это связано с механизмом образования трещиноватости и закарстованности, а также с различной природой пустот в скальных горных породах.

Помимо трещиноватости, общая пустотность скальных пород определяется их пористостью, кавернозностью и закарстованностью. Под собственно трещинами в геологической литературе в настоящее время понимают нарушение сплошности горных пород без значительного их смещения вдоль этого нарушения. Трещиноватость рассматривается большинством авторов, занимающихся гидродинамическим анализом движения жидкости в трещиноватых породах, как своеобразная пористость, при которой роль зерен играют блоки породы, а роль пор — разделяющие их трещины [171, 113]. Эти трещины (макротрещины) являются как бы порами первого порядка. В свою очередь блоки породы могут быть либо непроницаемыми, либо пористыми, кавернозными или разбитыми густой сеткой микротрещин (поры второго порядка).

Таким образом, в общем случае трещиноватые породы характеризуются двойной природой пустотности. Макротрещины (а также отдельные тектонические зоны, карстовые полости и каналы) в массиве скальных пород являются главными проводниками подземных вод и определяют в основном проницаемость трещиноватых пород. Система этих пустот характеризуется повышенной водопроводимостью, относительно низкой (иногда практически ничтожной) емкостью и высокой пьезопроводностью. Проницаемые блоки с пустотами второго порядка характеризуются малой водопроводимостью, повышенной емкостью и относительно низкой пьезопроводностью. Эти пустоты определяют преимущественно емкостные свойства трещиноватых пород.

Роль крупных карстовых полостей в общей емкости трещинно-карстовых пород обычно невелика, так как их суммарный объем

весьма незначителен в общем объеме породы. Так, по данным М. М. Сунцова, даже для такого типичного района классического карста, как СУБР, объем карстовых полостей составляет лишь 0,3% в общем объеме закарстованной породы [117]. Поэтому при дальнейшем изложении карстовые пустоты и полости рассматриваются как аналоги крупных трещин.

## 1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ*

Описанная структура строения трещинной среды вызывает ряд особенностей при движении жидкости в трещиноватых и трещинно-карстовых породах по сравнению с обычными зернистыми.

С точки зрения условий фильтрации жидкости трещиноватые породы по характеру и виду пустот в них целесообразно разделить на следующие основные типы.

1. Чисто трещиноватая порода, в которой блоки являются непроницаемыми и их пористость пренебрежимо мала, а основные запасы жидкости содержатся в трещинах. При этом все трещины характеризуются раскрытием одного порядка.

2. Трещиновато-пористая порода — проницаемость породы преимущественно определяется проницаемостью трещин, а пористость — пористостью (кавернозностью) блоков, реже пористость обеих систем сопоставима.

3. «Трещинно-трещинная», или неравномерно трещиноватая порода с двумя или более системами трещин существенно разного раскрытия — на густую сеть микротрещин различного генезиса наложена относительно редкая сеть более крупных трещин. Такие пласты могут рассматриваться как аналоги трещиновато-пористых, при этом микротрещины как бы играют роль пор, а макротрещины — собственно трещин.

Трещиноватые породы, характеризующиеся двойственной природой их пустотности (поры и трещины, микро- и макротрещины), называются также породами с «двойной пористостью».

Таким образом, основные отличия движения жидкости в трещиноватой породе по сравнению с зернистой, связанные со спецификой строения трещинной среды, вызываются:

1) наличием в породе двух типов пустот — «двойной пористостью» и существованием перетока между порами и трещинами, либо микро- и макротрещинами;

2) наличием редких крупных трещин, нарушающих радиальный или плоский характер потока и не позволяющих в ряде случаев рассматривать фильтрационное поле как сплошную среду;

3) наличием во многих случаях ярко выраженной анизотропии фильтрационных свойств трещиноватой среды.

---

* Движение воды рассматриваем по линейному закону фильтрации.

При этом наиболее существенные отличия проявляются при неустановившейся фильтрации, причем они связаны с двойственной природой пустотности трещиноватых пород.

Механизм фильтрации жидкости при возмущении в породах с двойной пористостью может быть представлен следующим образом.

При резком изменении напора в пласте, поскольку проницаемость трещин $K_1$ относительно высока, а пористость $n$ мала, несмотря на высокое значение коэффициента сжимаемости трещин $\beta_1$, коэффициент пьезопроводности $a_1$ оказывается весьма большим. За короткое время в системе трещин происходит перераспределение напора. В силу малой проницаемости блоков фильтрация жидкости в них происходит медленно, и напор может более или менее долго оставаться первоначальным. В результате между напором жидкости, заполняющей пористый блок, и напором в трещинах возникает скачок. Исчезновение скачка, а следовательно, и перераспределение напоров будет осуществляться постепенно в результате перетока части жидкости из блоков в трещины. Очевидно, этот процесс будет тем длительнее, чем меньше проницаемость блока, больше его размеры и пористость, а также сжимаемость жидкости и порового пространства [4].

Все сказанное относится и к «трещинно-трещинным» породам.

В настоящее время наметились два основных направления в рассмотрении процессов фильтрации жидкости в трещиноватых породах.

1. Трещиноватая порода рассматривается как сплошная среда, обладающая непрерывными свойствами. При этом подразумевается, что порода разбита достаточно большим числом трещин и расстояния между трещинами несоизмеримо меньше линейных размеров областей фильтрации, в которых происходят рассматриваемые процессы. Такой подход позволяет пренебречь размерами, конфигурацией и расположением отдельных трещин в пространстве (Г. И. Баренблатт, Ю. П. Желтов и др.).

2. Трещиноватая порода рассматривается как среда, разбитая системами правильно расположенных трещин с известной геометрией. Рассмотрение процессов фильтрации включает в себя изучение параметров трещиноватости горных пород (раскрытие трещин, интенсивность растресканности породы, элементы ориентировки трещин в пространстве) и законов движения жидкости в одиночных трещинах (щелях). Это направление в последние годы усиленно развивается во ВНИГРИ (Е. М. Смехов, Е. С. Ромм, Б. В. Позиненко и др.).

С точки зрения теории фильтрации первый подход является значительно более общим. В то же время в ряде случаев при наличии редкой сети крупных трещин их размерами и конфигурацией нельзя пренебречь без существенных погрешностей в гидродинамических расчетах.

Основные положения нестационарной фильтрации жидкости в трещиновато-пористой породе, основанные на рассмотрении такой породы, как сплошной среды, были разработаны Г. И. Баренблаттом и Ю. П. Желтовым [7, 8].

Трещиноватую породу они предложили представлять в виде двух пористых сред, вложенных одна в другую, с порами разных масштабов (рис. 30, *а*). Тогда движение жидкости можно рассматривать раздельно в системе трещин (среда 1), разделяющих пористые блоки, и в системе блоков (среда 2). При этом между обеими средами будет происходить обмен жидкостью.

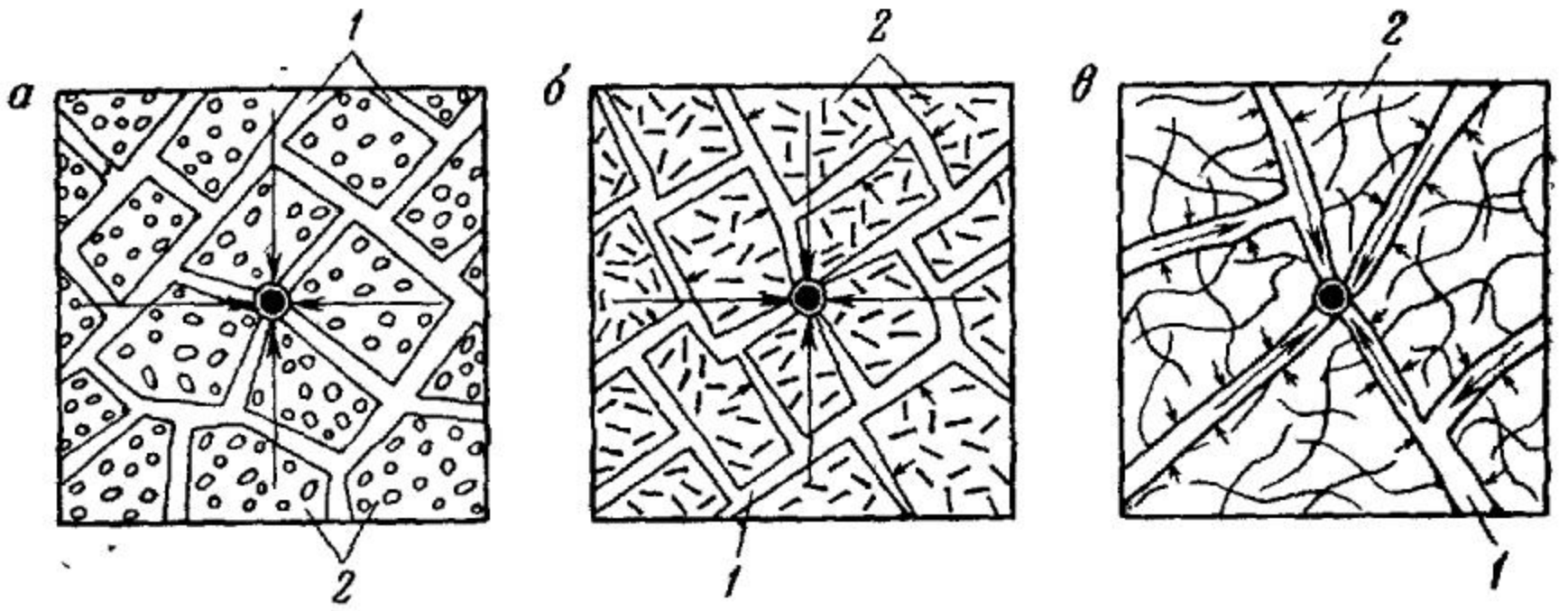



Рис. 30. Структура фильтрационного потока в трещиноватых породах:

*а* — трещиновато-пористая порода; *б* — неравномерно трещиноватая порода с интенсивным развитием крупных трещин; *в* — неравномерно трещиноватая порода редкой сетью крупных трещин. *1* — среда *1*; *2* — среда *2*

При принятых предпосылках фильтрация жидкости в такой породе была описана следующей системой уравнений:

$$\left.\begin{aligned} K_1 \Delta H_1 &= (\beta_{c_1} + n_1\beta)\frac{\partial H_1}{\partial t} - \alpha(H_2 - H_1) \\ K_2 \Delta H_2 &= (\beta_{c_2} + n_2\beta)\frac{\partial H_2}{\partial t} + \alpha(H_2 - H_1) \end{aligned}\right\}, \qquad (6.1)$$

где $H_1$ и $H_2$, $K_1$ и $K_2$, $n_1$ и $n_2$ — соответственно напор, коэффициент фильтрации и пористость сред 1 и 2;

$\beta_{c_1}$, $\beta_{c_2}$, $\beta$ — соответственно сжимаемость среды *1*, среды 2 и жидкости;

$\Delta$ — символ оператора Лапласа;

$\alpha$ — безразмерный коэффициент, характеризующий интенсивность обмена жидкостью между средами.

Величина $\alpha$ пропорциональна удельной поверхности трещины $\sigma$ и обратно пропорциональна среднему размеру блока $l$:

$$\alpha \approx K_2\sigma \approx \frac{K_2}{l^2}. \qquad (6.2)$$

Так как обычно $n_1 \ll n_2$ и $K_1 \gg K_2$, то $n_1 \approx K_2 \approx 0$ и, исключая $H_2$ из системы (6.1), имеем [7]:

$$\frac{\partial H_1}{\partial t} - \eta \cdot \frac{\partial (\Delta H_1)}{\partial t} = a \Delta H_1; \tag{6.3}$$

$$a = \frac{K_1}{(\beta_{c_2} + n_2 \beta)}; \quad \eta = \frac{K_1}{\alpha} \approx \frac{K_1}{K_2} l^2. \tag{6.4}$$

При $\eta \to 0$ уравнение (6.3) стремится к совпадению с уравнением фильтрации в обычной пористой среде при упругом режиме.

Решение уравнения (6.3), приведенное в работе [7], для неустановившегося притока к бесконечной галерее и скважине показало, что движение жидкости в трещиноватой породе по сравнению с зернистой характеризуется наличием характерного времени запаздывания переходных процессов $\tau$, связанного с большим объемом жидкости в малопроницаемых блоках:

$$\tau = \frac{\eta}{a}. \tag{6.5}$$

Как видно из (6.4) и (6.5), время запаздывания тем больше, чем больше соотношение коэффициентов фильтрации двух сред и характерные размеры блоков и чем меньше пьезопроводность пласта.

Г. И. Баренблаттом и Ю. П. Желтовым было показано, что с течением времени решение задачи о фильтрации жидкости в трещиновато-пористой породе асимптотически стремится к решению для обычной пористой среды. Поэтому если время рассматриваемых процессов $t$ достаточно велико по сравнению с $\tau$, то для расчетов можно пользоваться обычными уравнениями фильтрации в пористой среде Тейса или Тейса — Джейкоба.

Приведенные уравнения справедливы также и для «трещинно-трещинной» породы, если расстояния между крупными трещинами достаточно малы по сравнению с размерами области фильтрации и среду 1 можно рассматривать как сплошную среду (см. рис. 30, *б*).

При больших расстояниях между крупными трещинами, что встречается довольно часто в массивах кристаллических пород, их размерами и конфигурацией нельзя пренебречь, так как расстояния между ними вполне соизмеримы с размерами рассматриваемых областей фильтрации. Такие трещины, обладающие весьма высокими фильтрационными свойствами, играют как бы роль дрен для жидкости, содержащейся в более мелких трещинах (см. рис. 30, *в*). При этом характер обмена жидкостью между трещинами и блоками сохраняется, хотя характерное время запаздывания может быть значительно больше, чем в обычных пористых средах, ввиду весьма больших размеров «блоков».

Поскольку основные отличия фильтрации жидкости в трещиноватых породах проявляются наиболее существенно на начальных временах рассматриваемых процессов, их важно учитывать лишь при определении расчетных гидрогеологических параметров.

## 2. ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ В ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ С «ДВОЙНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ»

Как следует из полученных Г. И. Баренблаттом и Ю. П. Желтовым [7, 8] решений основной системы дифференциальных уравнений движения жидкости в трещиновато-пористом пласте (6.1), определение расчетных гидрогеологических параметров такого пласта возможно либо на основе непосредственного решения этих уравнений, либо по методике для обычных зернистых сред на основе решения уравнения Тейса — Джейкоба, когда время исследуемых процессов значительно больше характерного времени запаздывания.

Таким образом, обоснование возможности использования при расчете параметров уравнения Тейса — Джейкоба связано с необходимостью определения характерного времени запаздывания $\tau$.

Вопросы методики определения времени запаздывания рассматривались А. Баном [3, 4] на основе решения дифференциального уравнения (6.3) с использованием интегрального преобразования Лапласа. При этом для определения проницаемости использовалась формула Дюпюи, а затем $\tau$ определялось подбором из серии прямых в преобразованных по Лапласу координатах, отвечающих различным значениям $\tau$. Время запаздывания, рассчитанное для нескольких скважин на различных месторождениях нефти в трещиноватых пластах, составило от 5—6 мин до 17 ч, или 15—21% от полного времени восстановления давления.

По полученным данным был рассчитан также коэффициент $\alpha$, характеризующий интенсивность обмена жидкостью между трещинами и блоками. Полученные значения составляют $10^{-15}$—$10^{-18}$, а соответствующие им характерные размеры блоков от 1—10 до 600—870 см. Эти значения соответствовали проницаемости блоков $\sim 10^{-4}$ м/сутки [4].

Определение $\tau$ таким способом достаточно приближенно, а в условиях высоко проницаемых пластов вообще неопределенно, так как, с одной стороны, как будет показано ниже, сами расчеты проницаемости по формуле Дюпюи могут дать существенные ошибки, а с другой — предложенному способу в отношении точности расчетов свойственны все недостатки метода подбора и эталонных кривых в условиях относительно небольших понижений уровня.

При проведении опыта величины, определяющие $\tau$, остаются неизвестными. Поэтому по существу оказывается непрогнозируемой аналитически и сама величина $\tau$.

В более общем случае задача об определении параметров трещиновато-пористых пластов рассматривалась В. С. Кутляровым и и Ю. П. Желтовым [51]. При этом также использовалось интегральное преобразование Лапласа. Полученное выражение оказывалось весьма сложным, поэтому параметры было предложено определять по асимптоте графика, построенного в преобразованных по Лапласу координатах, отвечающей условиям фильтрации в обычной пористой

среде с проницаемостью $K_1 + K_2$ и пьезопроводностью $\frac{K_1+K_2}{\beta_1+\beta_2}$ ($\beta_1$ и $\beta_2$ — соответственно упругоемкости среды 1 и 2).

Несмотря на значительную громоздкость предложенных методов и в общем невысокую точность расчетов, определение параметров можно производить по асимптотической части преобразованных графиков, которая отвечает условиям простой пористой среды. При этом во всех работах отмечается, что при небольшом времени проведения опытов за асимптоту может быть принят начальный участок графика [4, 5].

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что определение параметров пород с двойной пористостью можно проводить обычным методом Джейкоба с использованием асимптотической части опытных закономерностей изменения уровня [15].

Для использования при расчетах параметров метода Джейкоба требуется установить:

1) насколько реальная картина фильтрации жидкости в трещинно-карстовых породах соответствует математической модели среды с «двойной пористостью»;

2) наличие на графиках изменения уровня асимптотических участков, соответствующих уравнению Джейкоба.

Для решения первого вопроса необходимо проанализировать характерную форму графиков $S$ — lg $t$ при откачках из трещиноватых и закарстованных пород. Проведенный анализ многочисленных графиков прослеживания понижения и восстановления уровня во времени показал, что в большинстве случаев они характеризуются весьма сложной формой, не отвечающей теоретической для однородного неограниченного водоносного горизонта.

Типовая форма графика приведена на рис. 1, *в*. Примеры реальных графиков иллюстрируются рис. 31, 38, 39.

Обычно на графиках $S$ — lg $t$ может быть выделено три участка.

Третий участок связан с макронеоднородностью водоносного горизонта либо с влиянием внешних границ пласта, что приводит к выполаживанию графиков или увеличению их крутизны в зависимости от характера действующих факторов.

Наличие на графике первых двух участков может быть объяснено различной ролью трещин и пор (или макро- и микротрещин) в процессе фильтрации жидкости или влиянием эффекта «двойной пористости». При этом деформация начальных участков графиков характерна не только для возмущающих скважин, что может быть связано с наличием скин-эффекта, но и для наблюдательных.

Наличие характерного излома на графиках восстановления давления в остановленных скважинах, эксплуатирующих трещинно-поровые нефтеносные пласты, отмечается также в работах А. Бана [14] и Р. И. Медведского [77]. Графики восстановления давления в скважинах, например на Ромашкинском месторождении, построенные в координатах $\Delta P$ и ln $t$, представляются двумя отрезками прямых, соединенных между собой плавным коротким промежутком [77].

Таким образом, уже наличие на графике $S$ — lg $t$ двух участков I и II, показанных на рис. 1, *в*, свидетельствует о том, что исследуемый пласт характеризуется двойной пористостью.

Математически течение жидкости в породе с «двойной пористостью» аналогично движению в двухслойном пласте. Оба процесса описываются аналогичными дифференциальными уравнениями. При этом они отличаются лишь коэффициентами при членах, выражающих разность напоров в обеих средах или пластах, а коэффициенту $\alpha$ соответствует $\frac{K_0}{h_0}$ ($h_0$ и $K_0$ — мощность и проницаемость перемычки).

Если в пласте с «двойной пористостью» $K_1 \gg K_2$, а $n_1 \ll n_2$, то движение жидкости аналогично движению в двухслойном пласте без разделяющего слоя со слабо проницаемым безнапорным верхним слоем, когда $K_1 \gg K_2$ и $\mu_1 \ll \mu_2$ (индексы 1 и 2 соответствуют нижнему и верхнему слою, $\mu$ — водоотдача пород), тогда $\eta$ соответствует коэффициенту $\frac{h_2}{K_2} \cdot K_1 h_1$.

При таком подходе нижний слой может рассматриваться как аналогичный трещинам, а верхний — пористым блокам.

Графики прослеживания понижения уровня во времени при откачках из двухслойных пластов (см. рис. 1, *г*) аналогичны типовому графику (см. рис. 1, *в*) и реальным графикам, приведенным на рис. 31, 38, 39. Аналогичную форму имеют также графики при откачках из безнапорных пластов (эффект Болтона).

Таким образом, описанная выше форма графиков наблюдается в тех случаях, когда в процессе откачки происходит изменение «эффективной водоотдачи» пласта во времени.

Следовательно, реальные условия фильтрации жидкости в трещинно-карстовой среде, находящие свое отражение в форме графиков $S$ — lg $t$, соответствуют математической модели породы с «двойной пористостью».

Поскольку величина $\tau$ нам неизвестна, для выбора расчетного асимптотического участка на графиках $S$ — lg $t$ должна быть проведена их качественная интерпретация. Как показано выше, она может быть осуществлена так же, как в двухслойных пластах или безнапорных водоносных горизонтах.

Первый участок на типовом графике соответствует периоду ложностационарной фильтрации. Теоретически этот участок должен иметь крутую левую ветвь, соответствующую периоду фильтрации при водоотдаче, определяемой емкостью крупных трещин. По этому участку тогда могут быть определены проницаемость и пьезопроводность среды 1. Практически такой участок наблюдается редко (см. рис. 31). Обычно левая крутая ветвь участка 1 вырождается, что выражается в виде резкого скачка уровня в наблюдательных скважинах при пуске откачки.

Абсолютная величина этого скачка, как правило, невелика ввиду высоких фильтрационных свойств трещин и редко превышает 40—60 см (обычно до 10—30 см). Вырождение этой ветви происходит

из-за весьма малой емкости крупных трещин. Действительно, при нулевой пористости трещин перераспределение уровней в них должно было бы происходить мгновенно, а участок ложностационарного режима иметь практически горизонтальную форму. Чем меньше разница в величине пористости двух сред (трещин и пористых блоков, макро- и микротрещин), тем хуже выражен участок ложностационарного режима. Он может иметь более или менее пологую достаточно прямолинейную форму (см. рис. 39) и легко быть принят за участок истинного квазистационарного режима. Такие случаи характерны для среды с двумя системами интенсивно развитых трещин существенно разного раскрытия.

При близких значениях пористости (упругоемкости) двух сред этот участок может быть вообще практически невыражен. Естественно, что определение параметров по этому участку даст резкое завышение рассчитанных значений коэффициентов водопроводимости и уровнепроводности. Продолжительность участка I может составлять от нескольких минут до сотен часов.

Постепенно, по мере того как формирование понижений начинает определяться водоотдачей основной массы микротрещин, пор и пустот, этап ложностационарной фильтрации заканчивается, крутизна графика увеличивается и он более или менее быстро приобретает прямолинейную форму (участок II на рис. 1, *в*).

Этот участок соответствует асимптоте, отвечающей условиям фильтрации в обычной пористой среде. По нему и следует определять параметры водоносного горизонта, характеризующие осредненные фильтрационные и емкостные свойства водовмещающей среды.

Сложность интерпретации графиков $S$ — $\lg t$ заключается в том, что поскольку величина $\tau$ остается неизвестной, асимптотический участок II может быть ошибочно принят за участок, связанный с влиянием непроницаемых границ или границ с зонами более низкой водопроводимости, а за расчетный принят участок I. В ряде случаев при расположении скважин вблизи границ участок II может практически вырождаться.

Если на графике выделяется левая крутая ветвь первого участка (участок I *а*), то интересно сопоставить результаты расчета параметров по участкам I*а* и II. Совпадение проводимостей свидетельствует о том, что по существу водопроводимость горизонта определяется только проницаемостью среды I. Пьезопроводность (уровнепроводность), определенная по участку II, всегда оказывается на порядок или более ниже, что подтверждает основную роль в формировании емкостных свойств водоносного горизонта среды 2.

Если водопроводимость, определенная по участку II, оказывается выше, чем по участку I*а*, следовательно, проницаемость среды 2 также играет заметную роль в формировании общей водопроводимости пласта. В противном случае уклон участка определяется также влиянием зон с более низкой проводимостью. В качестве примера проанализируем график на рис. 31, на котором достаточно четко выражены все участки, а участок I представлен в полной форме.

Откачка проводилась в долине р. Оки из напорного водоносного горизонта в закарстованных известняках нижнего карбона.

Параметры пласта, определенные по участкам I*а* и II*а*, оказываются весьма близкими, соответственно 2260 (2310) и 2340 м²/сутки, что свидетельствует о незначительной роли среды 2 в формировании проницаемости.

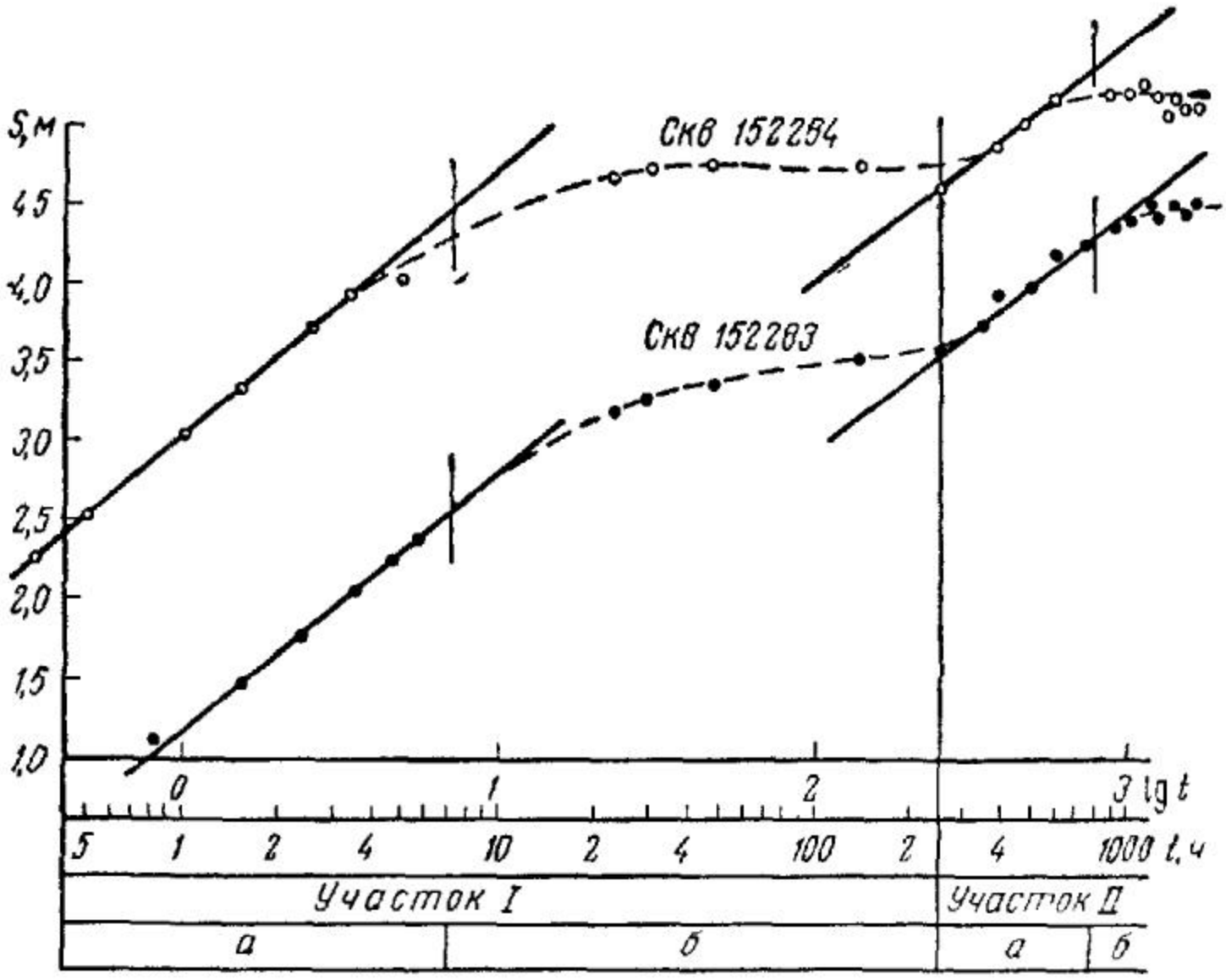



Рис. 31. Характерные графики временного прослеживания при откачке из куста 152610, 152611, 152612 в напорном трещинно-карстовом пласте с «двойной пористостью» вблизи реки (по данным А. Ф. Потемкиной, 1970 г., долина р. Оки)

| № наблюдательной скважины | $Q$, м³/сутки | № участка | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | $a$, м²/сутки | $\mu$ * |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 152284 | 20400 | Ia | 1,65 | 2260 | 3,03 | $2{,}96 \cdot 10^{7}$ | $0{,}76 \cdot 10^{-4}$ |
| $r_{пр}$ — 200 м | | IIa | 1,60 | 2340 | 0,90 | $1{,}55 \cdot 10^{6}$ | $15{,}0 \cdot 10^{-4}$ |
| 152283 | 20400 | Ia | 1,62 | 2310 | 1,18 | $3{,}02 \cdot 10^{7}$ | $0{,}76 \cdot 10^{-4}$ |
| $r_{пр}$ = 725 м | | IIa | 1,60 | 2340 | −0,25 | $3{,}75 \cdot 10^{6}$ | $6{,}25 \cdot 10^{-4}$ |

Наоборот, пьезопроводность, определенная по участку I*а*, оказывается нереально высокой и превышает значение по участку II в 10—20 раз.

Сопоставление величин упругой водоотдачи показывает, что среда 1 (крупные трещины и карстовые полости) дает лишь около 5—10% от общей упругой отдачи пласта. Совпадение проводимостей свидетельствует, что на участке II еще не сказывается влияние притока из реки. Оно проявилось позднее (участок II, *б*), когда уровень воды постепенно стабилизировался.

Проведенный анализ подтверждает, что исследуемый пласт характеризуется «двойной пористостью».

Следует иметь в виду, что при расчете параметров по асимптотической части графика $S$ — lg $t$ методом Джейкоба значения коэффициентов водопроводимости получаются достаточно надежными. Коэффициенты пьезопроводности (уровнепроводности) могут оказаться в большей или меньшей степени искаженными. Это связано с формой депрессии и характером ее развития в трещиноватом пласте.

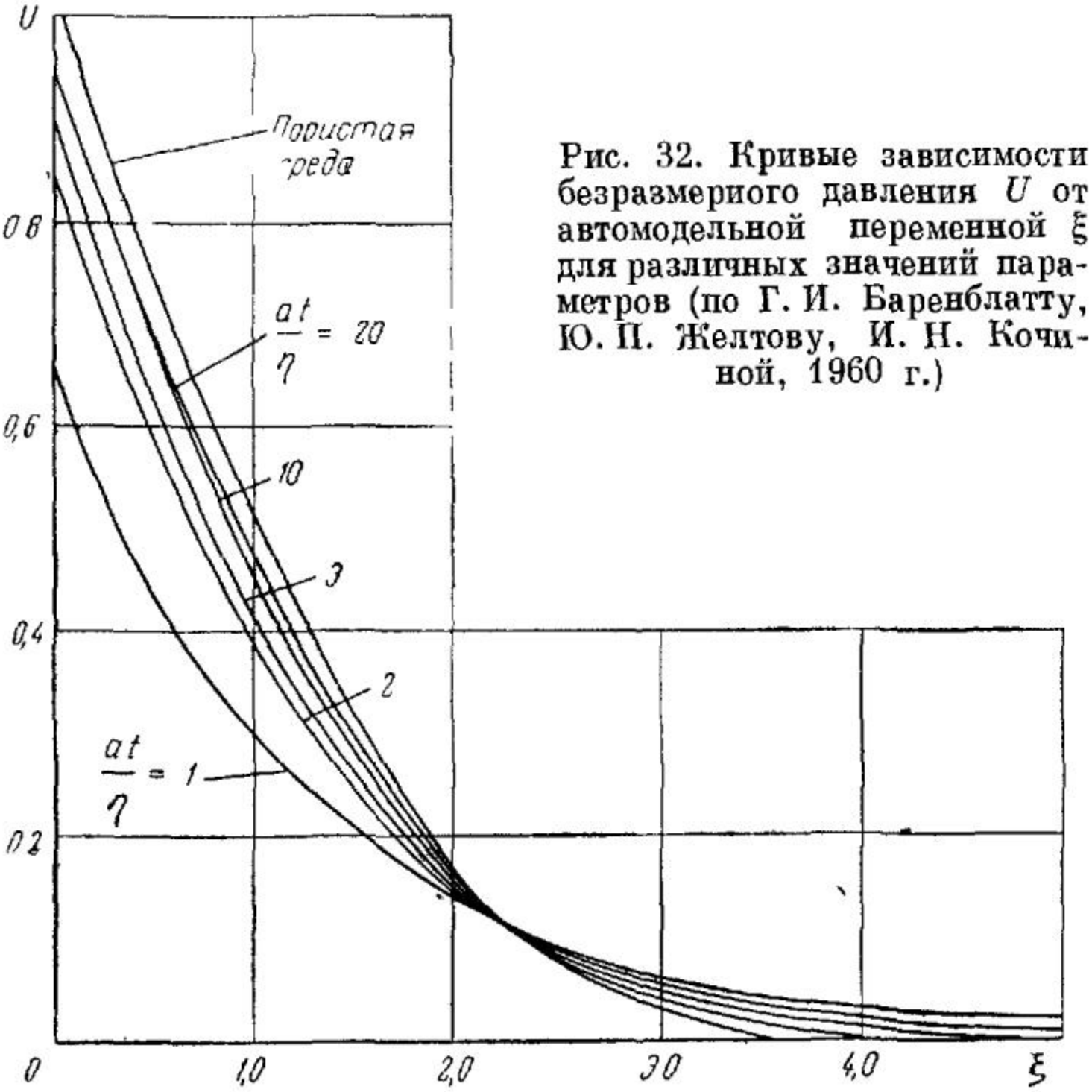



Рис. 32. Кривые зависимости безразмериого давления $U$ от автомодельной переменной $\xi$ для различных значений параметров (по Г. И. Баренблатту, Ю. П. Желтову, И. Н. Кочиной, 1960 г.)

На рис. 32 приведены кривые зависимости безразмерного давления $u$ от автомодельной переменной $\xi = \frac{x}{\sqrt{at}}$, полученные в работе [7] при решении на ЭЦВМ задачи о неустановившейся фильтрации к галерее в трещиновато-пористом пласте. Кривые построены для различных значений $\frac{at}{\eta}$. При возрастании $\frac{at}{\eta}$ (что может быть либо при $\eta \to 0$, либо при $t \to \infty$) распределение давления в трещиноватой породе стремится к распределению его в обычной пористой среде. Как видно из рисунка, кривая депрессии в трещиноватом пласте является более пологой, чем в обычном пористом.

Следовательно, только при достаточно большом времени откачки распределение понижений в трещиновато-пористом пласте будет отвечать уравнению Тейса — Джейкоба.

Соответственно, при небольших временах значения коэффициентов водопроводимости, рассчитанные по формуле Дюпюи или площадным графикам $S - \lg r$, могут оказаться существенно завышенными. Аналогичная картина будет наблюдаться в интенсивно трещиноватых и закарстованных породах, когда раскрытия трещин достаточно велики, так как при высокой проницаемости отдельных крупных трещин абсолютные понижения меняются мало по мере удаления наблюдательных скважин от опытной. Указанное положение иллюстрируется ниже при рассмотрении результатов расчета параметров на конкретных примерах. Несмотря на то что со временем распределения напоров в трещиновато-пористом и обычном пористом пласте стремятся к совпадению, некоторое различие остается. Это связано с тем, что между напорами в блоках и трещинах должен сохраниться определенный перепад для обеспечения в условиях квазистационарной фильтрации постоянного перетока из блоков в трещины. При больших абсолютных величинах понижений уровня относительная роль этого перепада невелика и параметры, рассчитанные по площадным и временным графикам, практически совпадают. В высоко проницаемых пластах при небольших понижениях уровня (первые десятки сантиметров) различия могут оказаться существенными, и коэффициенты водопроводимости, рассчитанные по площадным графикам, будут значительно превышать результаты расчета по временны́м и комбинированным (до 5—10 раз).

Коэффициенты уровнепроводности (пьезопроводности) в таких условиях могут быть также занижены или завышены в зависимости от характера трещиноватости пласта и местоположения наблюдательной скважины относительно опытной. Характерной особенностью пластов с интенсивно развитой трещиноватостью является видимое увеличение рассчитанных значений коэффициентов пьезо-(уровне-)проводности по мере удаления наблюдательных скважин от опытных, что хорошо видно на графике $a = f(r)$ на примере Мийкайнарского участка (см. рис. 40).

Так, в эквивалентном зернистом пласте в ближайшей окрестности опытной скважины понижения уровня больше, а в удалении — меньше, чем в трещиноватом (см. рис. 32). Естественно, что в первой зоне будут получены заниженные значения пьезо- или уровнепроводности (по ближним наблюдательным скважинам), а во второй — завышенные (по удаленным наблюдательным скважинам). Анализ материалов откачек по конкретным участкам показывает, что радиус зоны, в которой наблюдается занижение рассчитанных значений коэффициента уровнепроводности и соответственно более пологая депрессия, колеблется от нескольких метров в пластах со слабо развитой трещиноватостью до 150—200 м и более в интенсивно трещиноватых. Это связано с дренирующим влиянием крупных трещин. Такая зона может быть названа «зоной сверхпроводимости пласта».

На графике (см. рис. 40) хорошо видно, что с увеличением расстояния темп нарастания значений коэффициента уровнепроводно-

сти постепенно затухает и примерно с 400 м становится несущественным.

Анализ результатов опытных откачек в интенсивно трещиноватых и закарстованных пластах показывает, что в качестве расчетных следует принимать значения коэффициентов пьезо-(уровне-)проводности, полученные по наблюдательным скважинам, удаленным от опытной на расстояние не менее 1,5—2 $h$ ($h$ — мощность горизонта). В приведенном примере (см. рис. 40) мощность горизонта около 200 м. Следует иметь в виду, что эти значения могут характеризоваться большей или меньшей степенью завышения.

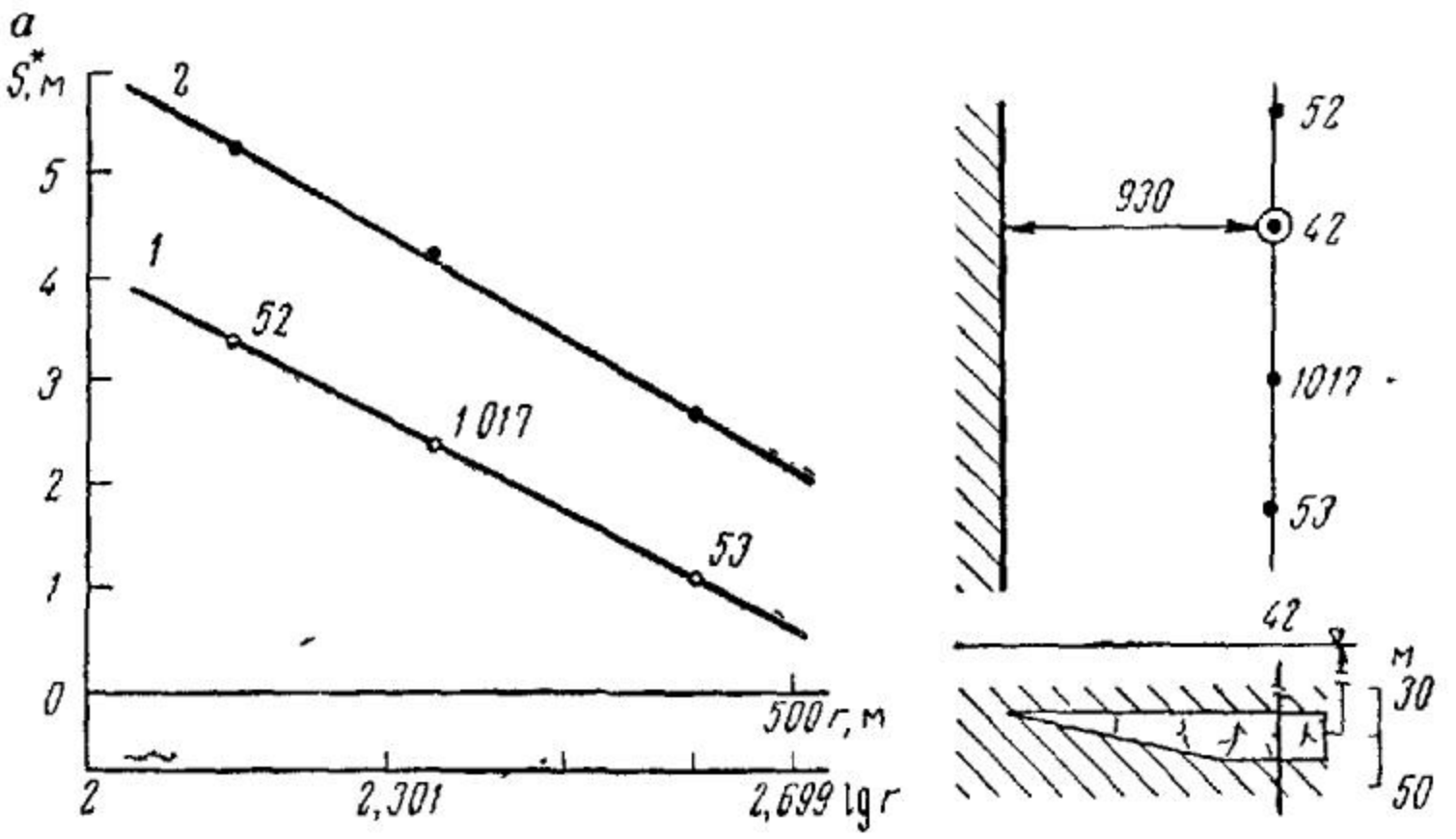
Более обоснованное расчетное значение может быть принято по графикам $a = f(r)$ на участке, где нарастание $a$ практически прекращается или становится незначительным. Это достижимо при достаточно большом количестве разноудаленных наблюдательных скважин (не менее 5—6 скважин).

Как уже отмечалось выше, при решении о выделении на графике $S - \lg t$ асимптотического участка II приходится ограничиваться чисто качественной интерпретацией. В условиях, когда график четко дифференцирован, выделение на нем асимптотического участка II не вызывает трудностей. При влиянии внешних границ диагносцирование графиков усложняется, так как, с одной стороны, требуется достаточно большая продолжительность опытов, чтобы влияние микронеоднородности пласта уже не сказывалось, а с другой, при большой продолжительности опытов начинает сказываться влияние границы пласта, что приводит к вырождению участка II для скважин, расположенных вблизи границ.

Кроме того, остается неясным, в каких случаях для контроля результатов расчета можно использовать площадные графики $S - \lg r$, а в каких расчеты по ним дадут завышенные результаты.

Существенную помощь при анализе достоверности получаемых результатов и интерпретации временных и площадных графиков могут оказать комбинированные графики $S - \lg \frac{t}{r^2}$. Они являются наиболее удобной формой обработки результатов откачек из трещиноватых пород. На них, как правило, пропадает видимость прямолинейности участка ложностационарного режима, что хорошо видно на примере откачки из скв. 40 на Мийкайнарской мульде при сопоставлении графиков $S - \lg t$ (см. рис. 39) и $S - \lg \frac{t}{r^2}$ (см. рис. 41).

В условиях обычных равномерно трещиноватых пластов с «двойной пористостью» или чисто трещинных эти графики, построенные по разным наблюдательным скважинам, при квазистационарном режиме выходят на одну асимптотическую ветвь, как это имеет место в безнапорных пластах при эффекте Болтона. В этом случае параметры, рассчитанные по площадным графикам $S - \lg r$, будут совпадать с параметрами по графикам $S - \lg t$ и $S - \lg \frac{t}{r^2}$. Однако площадные



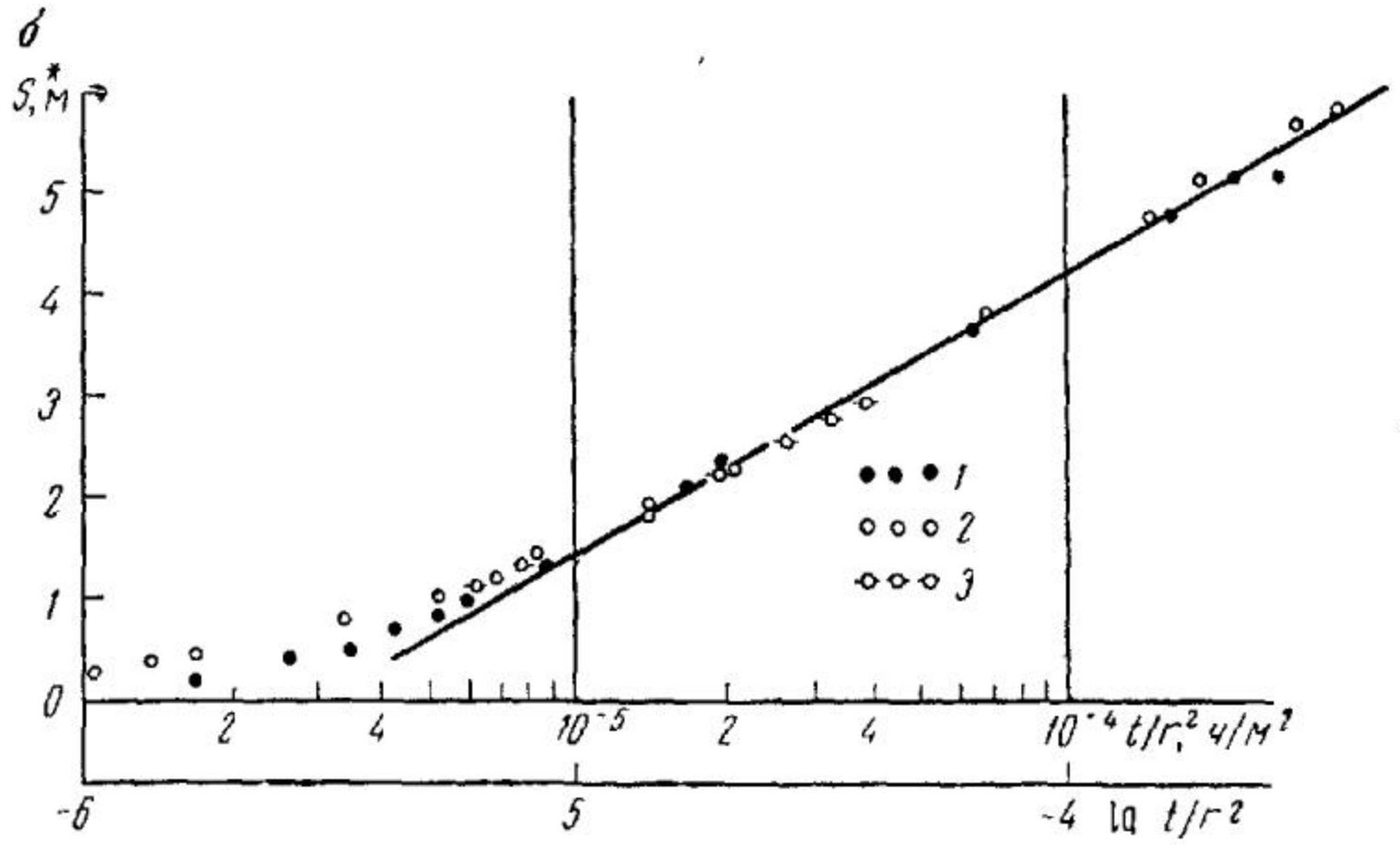




Рис. 33. Графики прослеживания (Саксонская Швейцария, 1965 г.):

*а* — площадного прослеживания восстановления на моменты *t*: *1* — 1 ч, *2* — 5 ч; *б* — комбинированного прослеживания при расстояниях *r* наблюдательных скважин: *1* — 140 м, *2* — 220 м, *3* — 400 м

| Способ обработки | № прямой | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | lg a | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $S^*$—lg $r$ | 1 | 1620 | 5,15 | 115 | 14,45 | 5,24 | $4{,}2 \cdot 10^6$ |
| | 2 | 1620 | 5,8 | 102 | 17,75 | 5,07 | $2{,}8 \cdot 10^6$ |
| $S^*$—lg $\frac{t}{r^2}$ | 1 | 1620 | 2,75 | 108 | 15,15 | 5,16 | $3{,}5 \cdot 10^6$ |

графики должны строиться лишь на время, соответствующее выходу графиков $S - \lg \frac{t}{r^2}$ на асимптотическую ветвь.

Соответственно, в таких условиях будут получены коэффициенты пьезопроводности, близкие к реальным.

Примером подобных условий может служить Розентальский участок (рис. 33). Объектом опробования являлся напорный

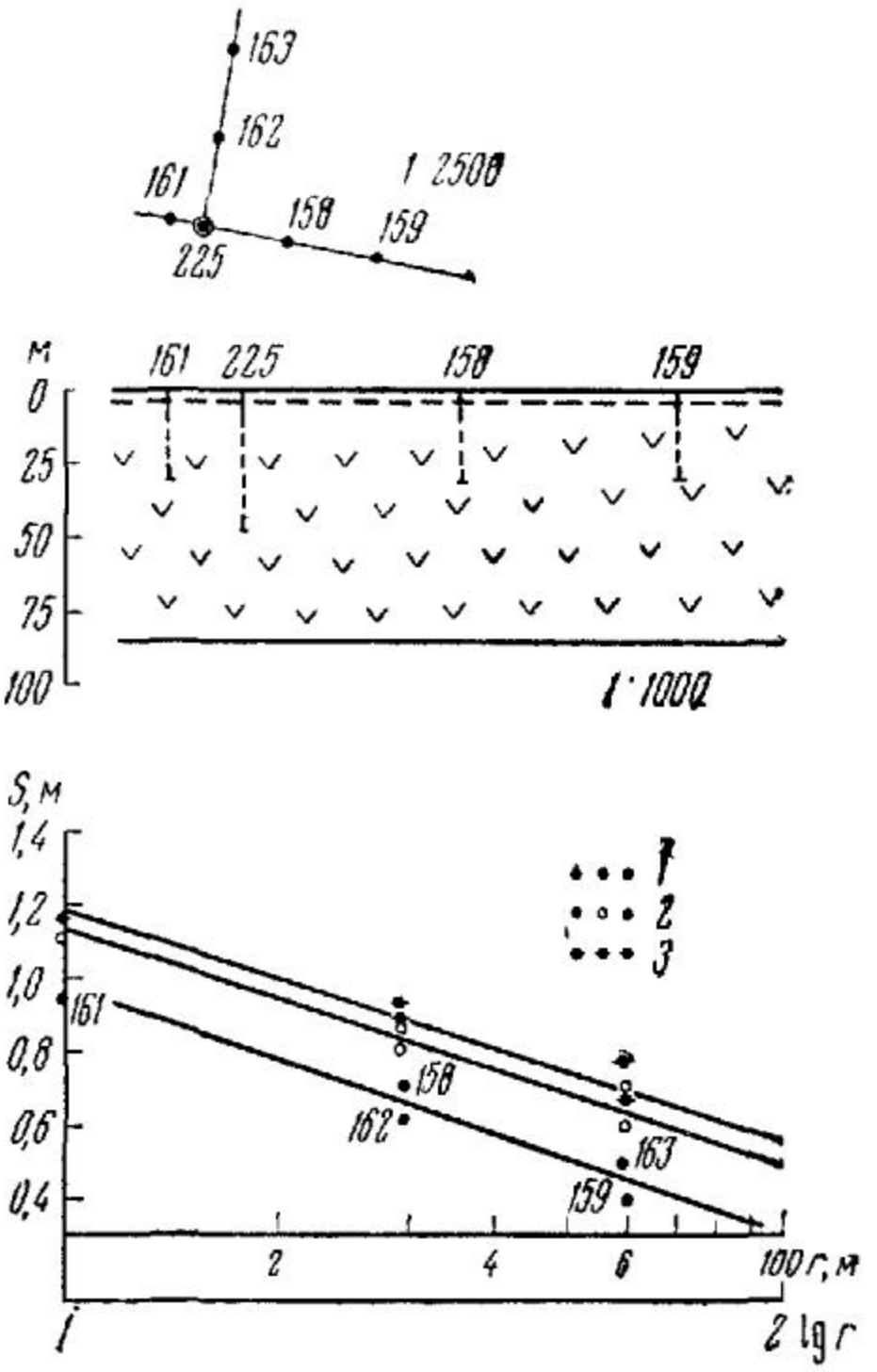



Рис. 34. Графики площадного прослеживания понижения в относительно равномерно-трещиноватом водоносном горизонте при кустовой откачке с $Q = 536$ м³/сутки на моменты времени $t$:

*1*—1500 мин, *2* — 4380 мин, *3* — 9720 мин (по данным Л. М. Самсоновой, 1970 г., Урал)

| $t$, мин | $\lg t$ | $C$ | $km = \frac{0{,}366Q}{C}$ | $A$ | $\lg a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1500 | 3,176 | 0,67 | 293 | 1,65 | 1,394 | $3{,}6 \cdot 10^4$ |
| 4380 | 3,641 | 0,64 | 307 | 1,78 | 1,569 | $5{,}3 \cdot 10^4$ |
| 9720 | 3,987 | 0,64 | 307 | 1,82 | 1,353 | $3{,}3 \cdot 10^4$ |

полуограниченный водоносный горизонт в кварцевых песчаниках. График комбинированного прослеживания по истечении 10 мин становится общим для всех трех наблюдательных скважин. Выход графика на одну асимптотическую ветвь свидетельствует об отсутствии влияния непроницаемой границы в анализируемом интервале времени. Параллельность и линейность площадных графиков прослеживания также свидетельствует о квазистационарности режима. Параметры, определенные по площадным и комбинированным графикам,

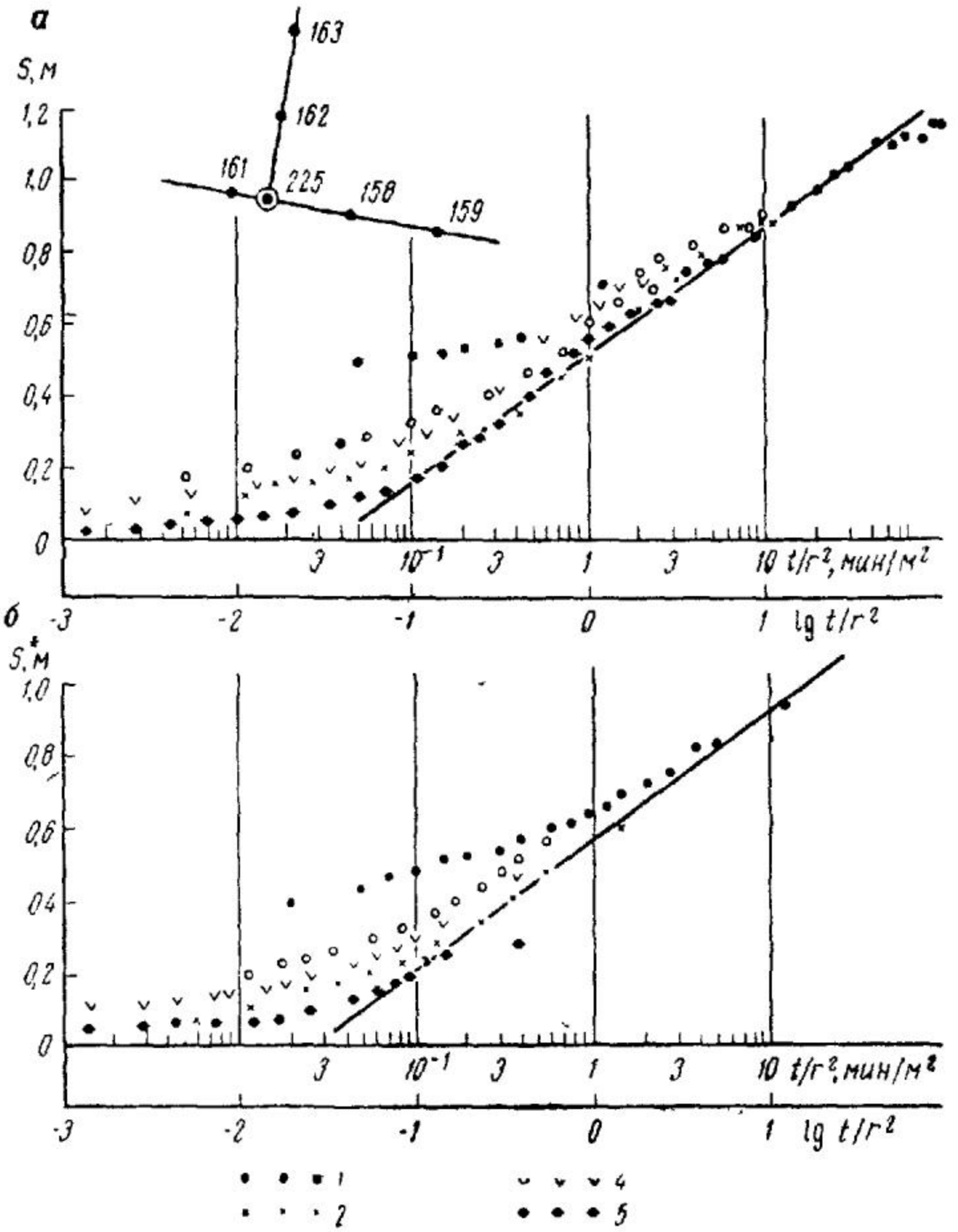



Рис. 35. Графики комбинированного прослеживания (условия см. на рис. 34):

*а* — понижения уровня; *б* — восстаиовления уровня. Расстояния *r* наблюдательных скважии: *1* — 10 м, *2* — 30 м, *3* — 30 м, *4* — 59 м, *5* — 59 м

| Наименование опыта | $Q_{ср}$, м³/сутки | $C$ | $km=\frac{0,183Q}{C}$ | $A$ | lg $a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Понижение | 536 | 0,36 | 272 | 0,52 | 1,095 | $1,8\cdot10^4$ |
| Восстановление | 536 | 0,36 | 272 | 0,57 | 1,235 | $2,5\cdot10^4$ |

практически совпадают, что свидетельствует об их действительном характере.

Однако в данном случае эффект «двойной пористости» не фиксируется практически и на графиках временного прослеживания, что связано либо с отсутствием этого эффекта, либо с очень маленьким временем запаздывания.

Пример Уральского участка, где на временных и комбинированных графиках эффект «двойной пористости» четко выражен, дает подобный же результат (рис. 34, 35).

Комбинированные графики выходят на одну асимптотическую ветвь, а рассчитанные по ним параметры совпадают с результатами расчета по площадным графикам (табл. 10). Здесь объектом опробования являлся трещинный водоносный горизонт, приуроченный к верхней трещиноватой зоне девонских порфиритов.

Таблица 10

| Способы обработки | Водопроводимость $km$, м²/сутки | Уровнепроводность $a$, м²/сутки | Водоотдача $\mu$ |
|---|---|---|---|
| $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | 272 | $1{,}8 \cdot 10^4$ | 0,015 |
| $S^* - \lg \frac{t}{r^2}$ | 272 | $2{,}5 \cdot 10^4$ | 0,011 |
| $S - \lg r$ | 307 | $3{,}2 \cdot 10^4$ | 0,01 |

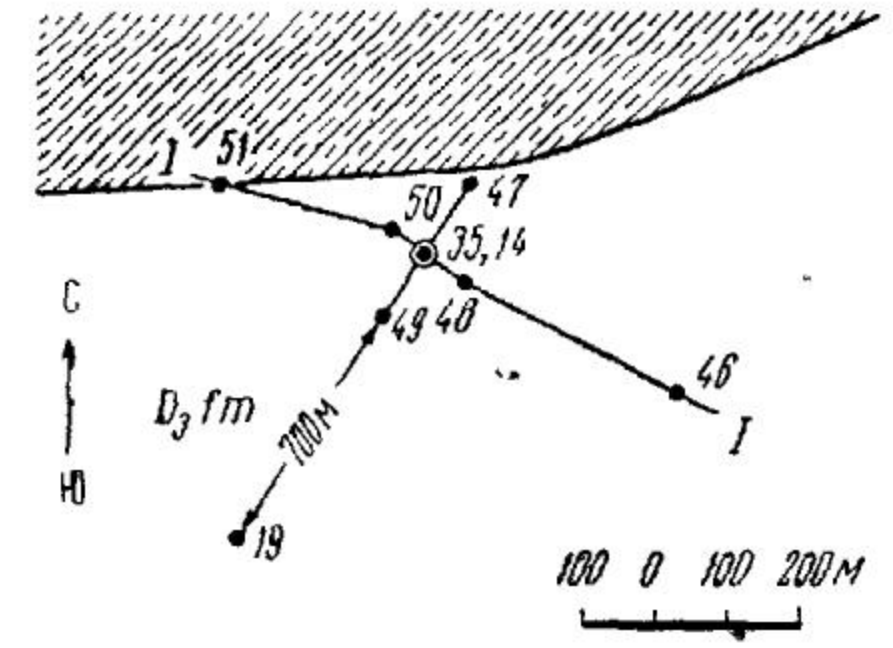
Время запаздывания в данном примере не превышало 1,4—2,9 ч.

В условиях интенсивно трещиноватых и закарстованных известняков, когда величина перепада уровней (напоров)на контакте блок—трещина, либо между крупными и мелкими трещинами соизмерима с величиной понижений, графики $S - \lg \frac{t}{r^2}$ в условиях квазистационарного режима параллельны между собой (см. рис. 41). В этом случае будут наблюдаться существенные различия между коэффициентами *водопроводимости, определенными по временным или* комбинированным и площадным графикам. Коэффициенты пьезо-(уровне-)проводности по удаленным скважинам оказываются завышенными.

Критерием выбора расчетных участков здесь может служить форма временных и параллельность комбинированных графиков, построенных по различным наблюдательным скважинам. Такие случаи наиболее сложны для интерпретации, так как в выбранных для расчета асимптотических участках временных и комбинированных графиков может быть уже отражено влияние дополнительного питания, что приведет к завышению коэффициента водопроводимости, либо влияние непроницаемых границ, приводящее к его занижению.

Таким образом, наибольшие сложности возникают при интерпретации результатов откачек из ограниченных пластов, сложенных интенсивно трещиноватыми и закарстованными породами.

Рассмотрим эти вопросы на примере Мийкайнарского участка. *Объектом опробования* на этом участке являлся безнапорный трещинно-карстовый водоносный горизонт в известняках фамена. Последние залегают в виде полосообразного пласта вертикального падения шириной до 2250 м, ограниченного в плане практически непроницаемыми границами. Мощность водоносного горизонта достигает 200 м, мощность наиболее обводненной верхней зоны около 100 м.



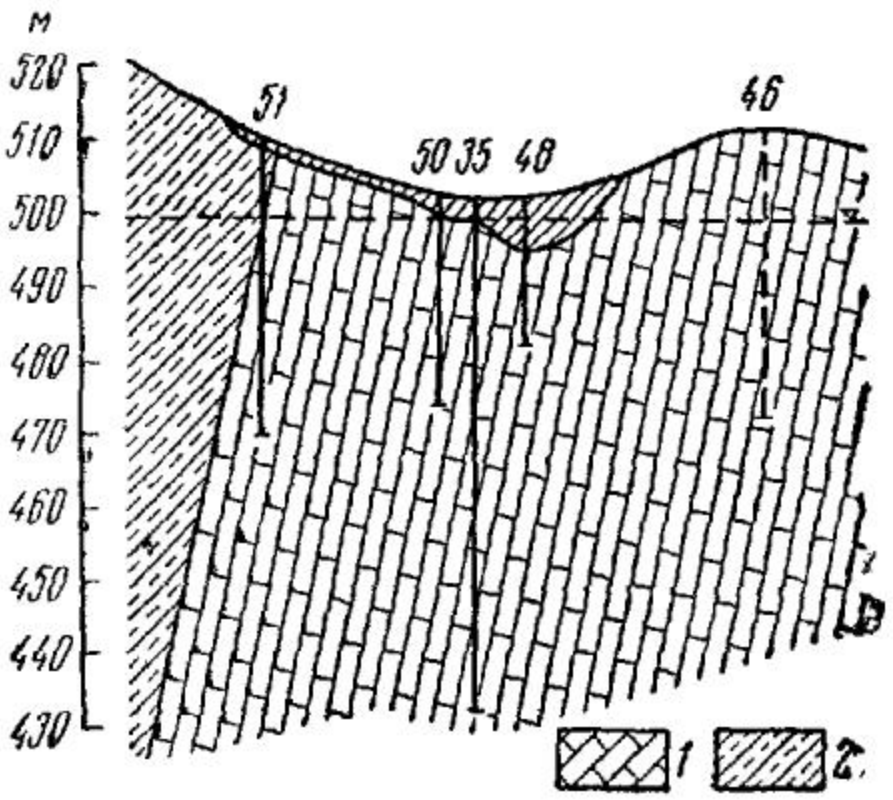




Рис. 36. Схема и разрез по *I—I* трещинно-карстового пласта для куста 35 вблизи непроницаемой границы (По данным О. В. Слинко, 1966 г., Центральный Казахстан):

*1* — водоносный горизонт в известняках; *2* — слабо проницаемые породы

Водовмещающие известняки *отличаются высокой степенью* хаотической неоднородности, интенсивной трещиноватостью. Водоносный горизонт на рассматриваемом участке опробован двумя кустовыми откачками из возмущающих скважин 35 и 40. Первая расположена в 100 м от непроницаемой границы (рис. 36), вторая — в центре полосы, в 860 м от ближайшей границы (рис. 37).

Временные графики прослеживания, полученные во всех наблюдательных скважинах обоих кустов, однотипны по форме и состоят из двух прямолинейных участков: начального пологого и конечного более крутого (рис. 38, 39). Диагностирование графиков здесь неоднозначно. Наличие двух участков может быть связано с влиянием непроницаемых границ либо с эффектом «двойной пористости». В первом случае представительным для обработки будет начальный участок, во втором — конечный. Кроме того, может наблюдаться влияние обоих факторов, тогда первый участок — участок ложностационарного режима, второй — отражает влияние границ, т. е. расчетный участок II на графике может вырождаться.

Отношение угловых коэффициентов начального и конечного участков равно 2—3, т. е. ошибка за счет неправильной квалификации расчетного участка будет двух-трехкратной.

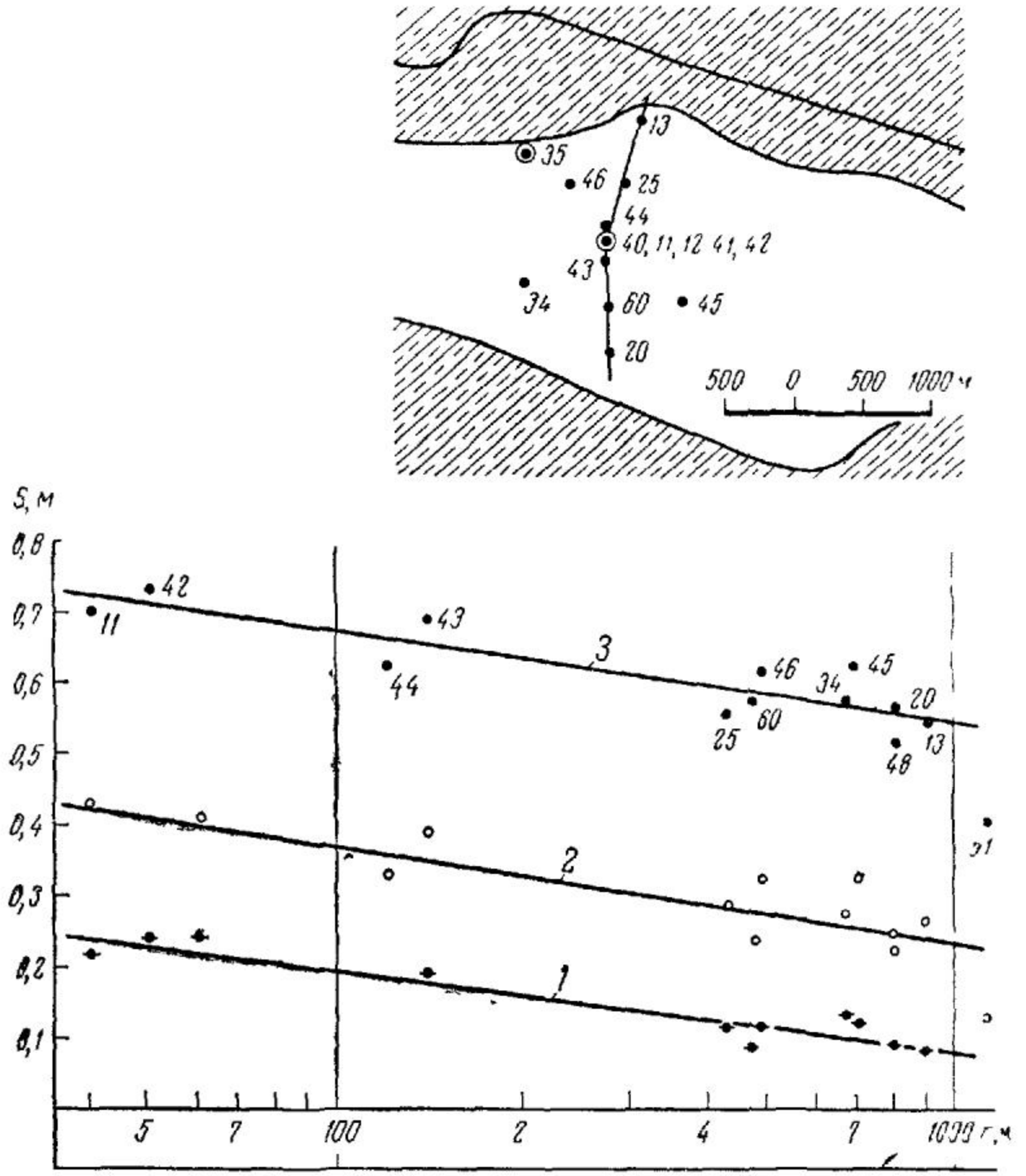



Рис. 37. Схема куста 40 и графики площадного прослеживания в трещинно-карстовом водоносном горизонте на моменты времени $t$:

1 — 23 ч, 2 — 86 ч, 3 — 500 ч

| $t$, ч | $C$ | $km=\frac{0{,}366Q}{C}$ | $A$ | $\lg a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 0,11 | 8450 | 0,415 | 7,20 | $1{,}58\cdot10^{7}$ |
| 86 | 0,13 | 7150 | 0,630 | 8,784 | $6{,}1\cdot10^{8}$ |
| 500 | 0,12 | 7740 | 0,910 | 13,512 | $3{,}26\cdot10^{13}$ |

Анализируя полученные графики, можно видеть реальность эффекта «двойной пористости» как фактора, определяющего их форму.

Так, скважины 47 и 51 при откачке из куста 35 (см. рис. 36) находятся практически на границе. Поэтому графики по этим скважинам при отсутствии эффекта «двойной пористости» должны были

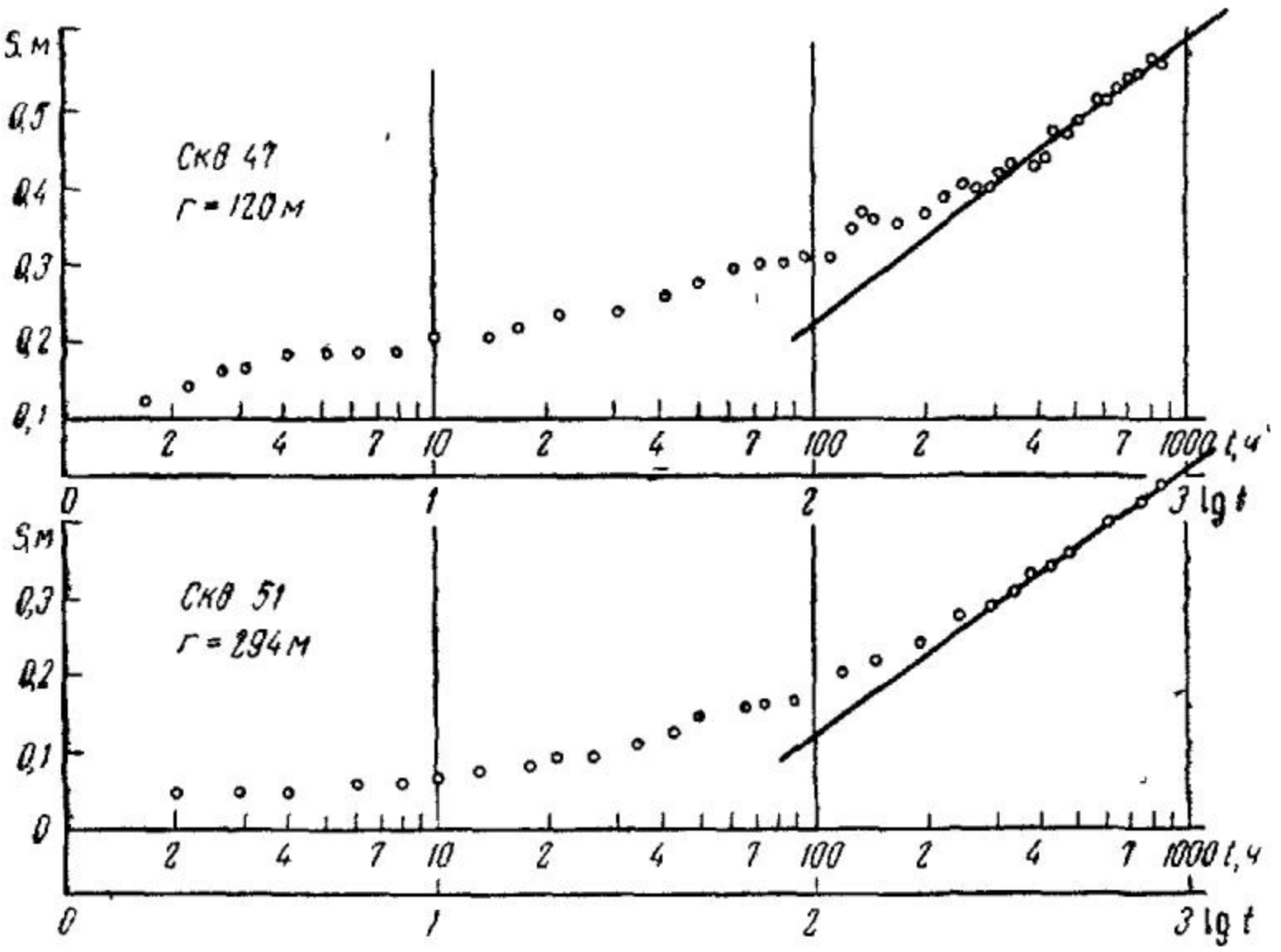



Рис. 38. Характерные графики временного прослеживания по опытному кусту 35 (условия см. на рис. 36)

| № наблюдательной скважины | r, м | Q, м³/сутки | C | km, м²/сутки | A | lg a | a, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 47 | 120 | 960 | 0,37 | 476 | −0,51 | 2,428 | $6{,}4 \cdot 10^2$ |
| 51 | 294 | 960 | 0,35 | 503 | −0,585 | 2,916 | $2{,}0 \cdot 10^4$ |

бы иметь один прямолинейный участок, отражающий влияние границы во всем диапазоне продолжительности опыта с момента наступления квазистационарного режима. Фактически время появления конечных участков на графиках по скв. 47 и 51, как и во всех остальных наблюдательных скважинах, составляет 120—400 ч и практически не зависит от их местоположения относительно границы. Аналогичная картина наблюдается при откачке из куста 40, при которой время появления конечного участка независимо от местоположения наблюдательных скважин равно 6—90 ч.

При этом по скважинам, близким к опытной, появление второго участка происходит значительно раньше контрольного времени,

определяющего наступление квазистационарного режима. Следовательно, влияние непроницаемой границы не является причиной наблюдаемой формы временных графиков, а наличие двух участков связано с «двойной пористостью» водовмещающей среды.

Результаты определений коэффициентов водопроводимости и уровнепроводности по конечным участкам графиков представлены

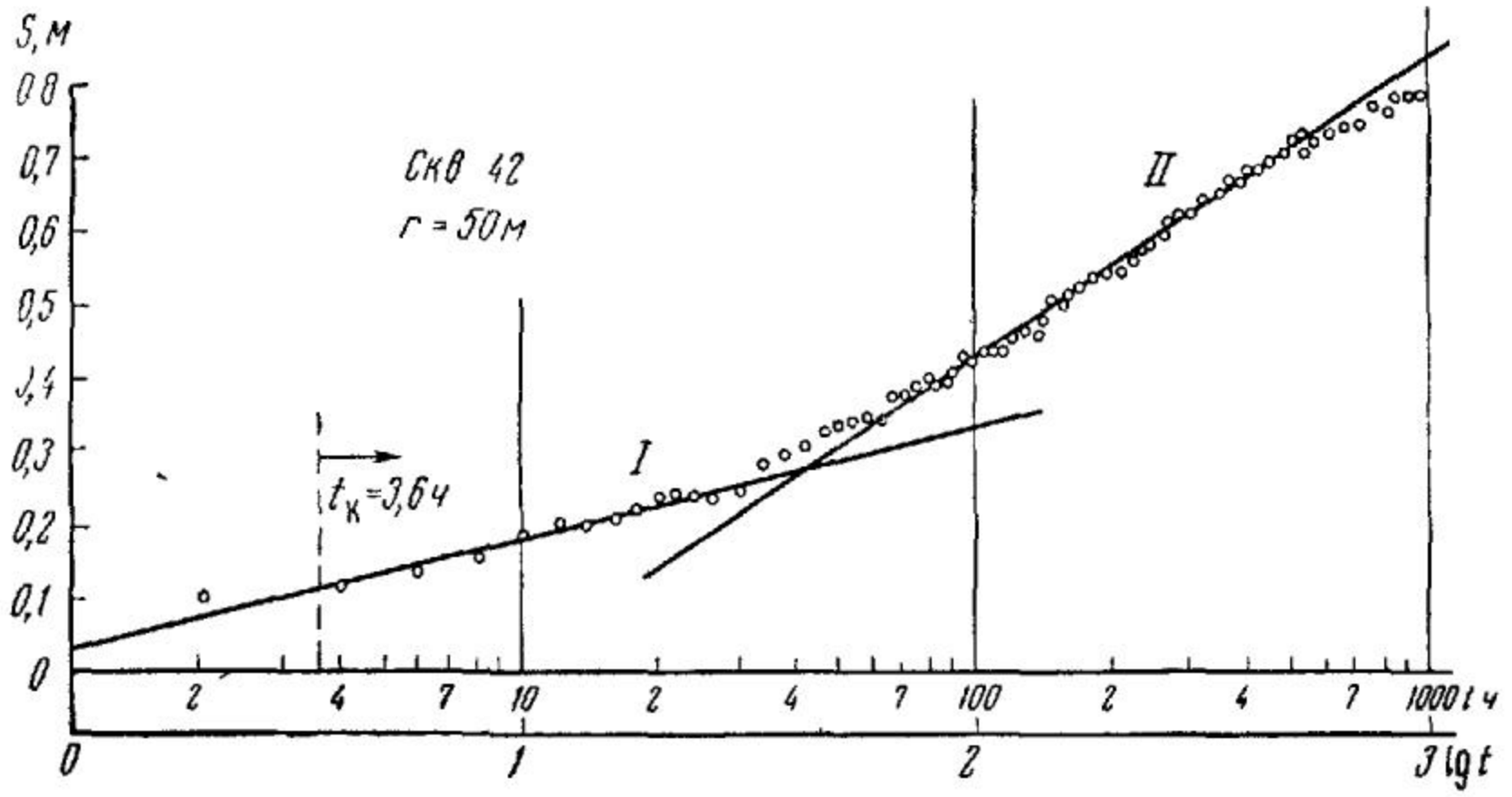



Рис. 39. Характерный график временного прослеживания при опробовании трещинно-карстового водоносного горизонта опытным кустом 40 (условия см. на рис. 37)

| № участка графика | $Q$, м³/сутки | $S_2$, м | $S_1$, м | $S_2-S_1$, м | $\lg\frac{t_2}{t_1}$ | $C=\frac{S_2-S_1}{\lg t_2-\lg t_1}$ | $km=\frac{0{,}183Q}{C}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 2540 | 0,183 | 0,03 | 0,153 | 1 | 0,153 | 3040 |
| II | 2540 | 0,85 | 0,43 | 0,42 | 1 | 0,42 | 1108 |

| № участка графика | $r$, м | $\lg r$ | $2\lg r$ | $A$ | $\frac{A}{C}$ | $\lg a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| I | 50 | 1,699 | 3,398 | 0,03 | 0,196 | 3,244 | $4{,}2\cdot10^4$ |
| II | 50 | 1,699 | 3,398 | −0,4 | −0,953 | 2,095 | $3{,}0\cdot10^3$ |

в графической форме на рис. 40 в зависимости от расстояния между расчетными наблюдательными скважинами и опытной. Как хорошо видно на графиках, по обоим кустам отмечается независимость $km$ от расстояния и возрастание $a$ по мере удаления от опытной скважины.

По обоим кустам значения параметров различаются по абсолютным величинам примерно в 2 раза, что требует объяснения с целью анализа полученных величин.

Непроницаемые границы, хотя и не являются причиной основной деформации графиков $S$ — lg $t$, могут оказывать влияние на уклон

их конечных участков. Приведенное расстояние $r$ до наблюдательных скважин по кусту 35 изменяется в пределах 2—0,1, а время появления конечного участка не менее 120 ч. Это позволяет утверждать, что влияние границы нашло отражение в конечном участке графиков. Причем совпадение параметров по скважинам 47 и 51, расположенным непосредственно у границы, и более удаленным скважинам свидетельствует о том, что квазистационарный режим наступил в условиях влияния непроницаемой границы, т. е. уклоны конечных участков графиков (см. рис. 38) завышены в два раза по отношению к уклонам в безграничном пласте.

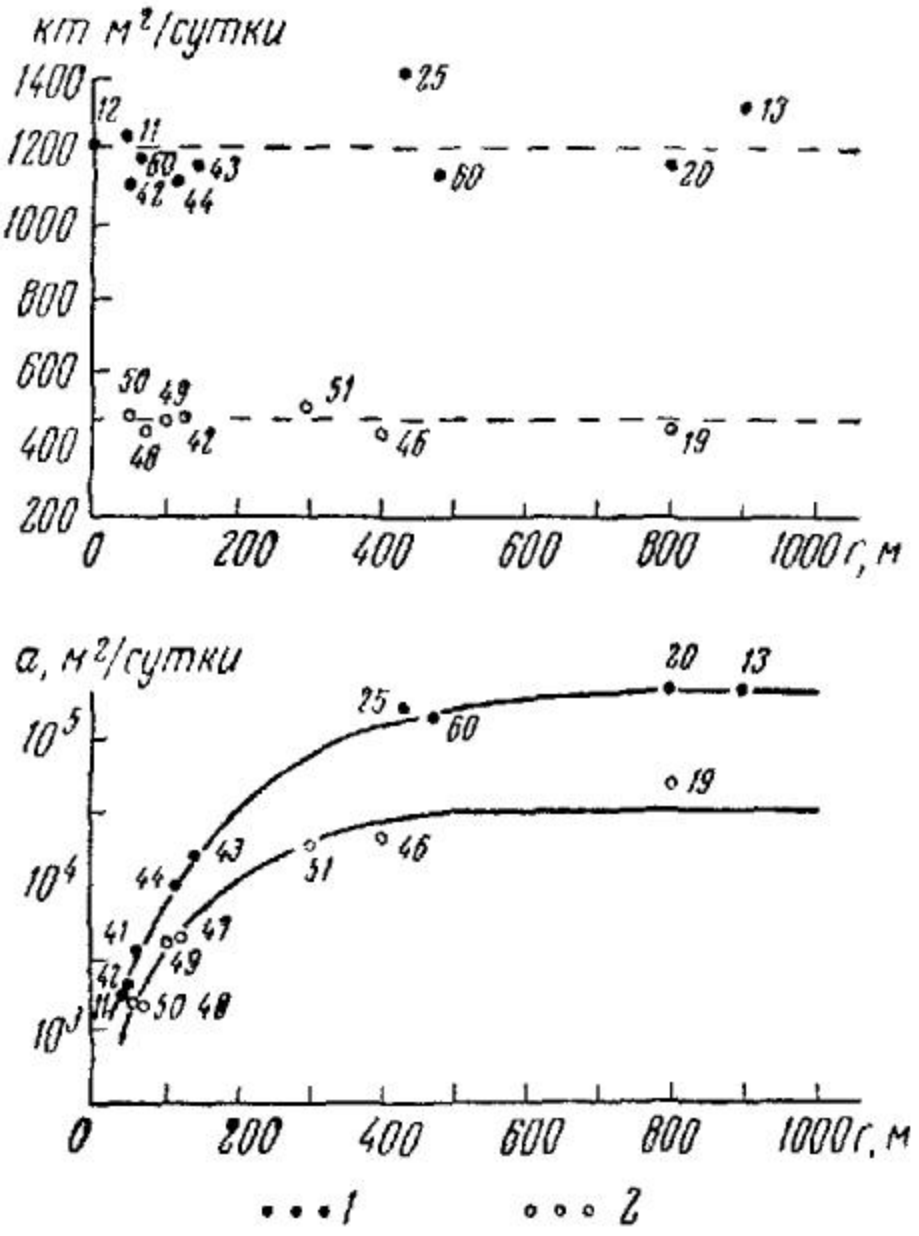



Рис. 40. Графики зависимости коэффициентов водопроводимости и уровнепроводности, рассчитанных по временному прослеживанию, от удаленности наблюдательных скважин от возмущающих:
*1* — для куста 40; *2* — для куста 35

Таким образом, коэффициенты водопроницаемости 450—500 м²/сутки, полученные по конечным участкам графиков $S$ — lg $t$ куста 35 с учетом эффекта «двойной пористости», но без учета влияния границы, занижены в два раза. Тогда действительные величины по кусту 35 составят 900—1000 м²/сутки.

По кусту 40 величины приведенного расстояния изменяются в пределах $r = 2$—20. При таких значениях приведенного расстояния продолжительность периода опыта, свободного от влияния границ, достаточно велика ($t > 5\ t_к$). Скважины 13 и 20 расположены вблизи границы $r = 1$, но и здесь влияние границы практически неощутимо.

Поэтому коэффициенты водопроводимости, определенные по конечным участкам временных графиков куста 40 (1100—1200 м²/сутки) можно квалифицировать как действительные. Как видно, по обоим кустам получены близкие величины водопроводимости.

Закономерности изменения уровнепроводности по разным скважинам соответствуют влиянию эффекта «двойной пористости» в интенсивно и неравномерно трещиноватых пластах (см. рис. 40). При этом величина $a$ по кусту 35 получена с учетом влияния границы, а по кусту 40 — без него. В качестве расчетного может быть принято значение $2{,}5 \cdot 10^5$ м²/сутки по той части графика $a = f(r)$, где он становится параллельным оси абсцисс. Полученное значение должно

быть несколько завышено. Действительно, величина водоотдачи, определяемая из соотношения

$$\mu = \frac{km}{a} = \frac{1200}{2{,}5 \cdot 10^5} \approx 0{,}005,$$

оказывается для данных водовмещающих пород заниженной.

Характер изменения уровнепроводности с расстоянием свидетельствует, что в данных условиях влияние эффекта «двойной пористости» проявляется в наиболее полной мере. Следовательно, асимптотические участки комбинированных графиков по разным наблюдательным скважинам должны быть параллельны между собой, а абсолютные величины параметров, рассчитанные по площадным графикам $S - \lg r$ (или формуле Дюпюи), существенно завышены. Действительно, график комбинированного прослеживания по кусту 40 представляет собой семейство параллельных прямых (рис. 41). Параметры, определенные по комбинированному и временным графикам практически совпадают.

На рис. 37 представлен график площадного прослеживания по кусту 40, который при некотором рассеянии точек может быть аппроксимирован прямой линией. Коэффициенты водопроводимости, определенные по этому графику, оказываются завышенными в 6—7 раз, а уровнепроводности на несколько порядков.

Таким образом, на примере Мийкайнарского участка весьма ощутимо проявление эффекта «двойной пористости», что выражается в сложной форме временных графиков, закономерном увеличении пьезопроводности с расстоянием, параллельности комбинированных графиков, существенном завышении параметров, рассчитанных способом площадного прослеживания.

Анализ результатов опытных откачек из различных трещинных и трещинно-карстовых водоносных горизонтов показывает, что характер опытных закономерностей изменения уровня зависит от типа пустотности трещинной среды, различий фильтрационных свойств отдельных видов пустотности, а также интенсивности трещиноватости и закарстованности породы.

В условиях сочетания эффекта «двойной пористости» с различными граничными факторами аномальности при анализе данных опытных откачек возможны следующие варианты:

а) влияние границ проявляется на временных и комбинированных графиках в форме появления конечного более пологого или более крутого участка; расчетный асимптотический участок формируется до начала влияния границ; график имеет характерную форму;

б) влияние границ, не деформируя характерной формы графиков, изменяет угловой коэффициент асимптотического участка графика;

в) влияние границ деформирует характерную форму графика, не позволяя выделить асимптотический расчетный участок на временных и комбинированных графиках.

В последнем случае задача расчета гидрогеологических параметров методом Джейкоба становится неопределенной.

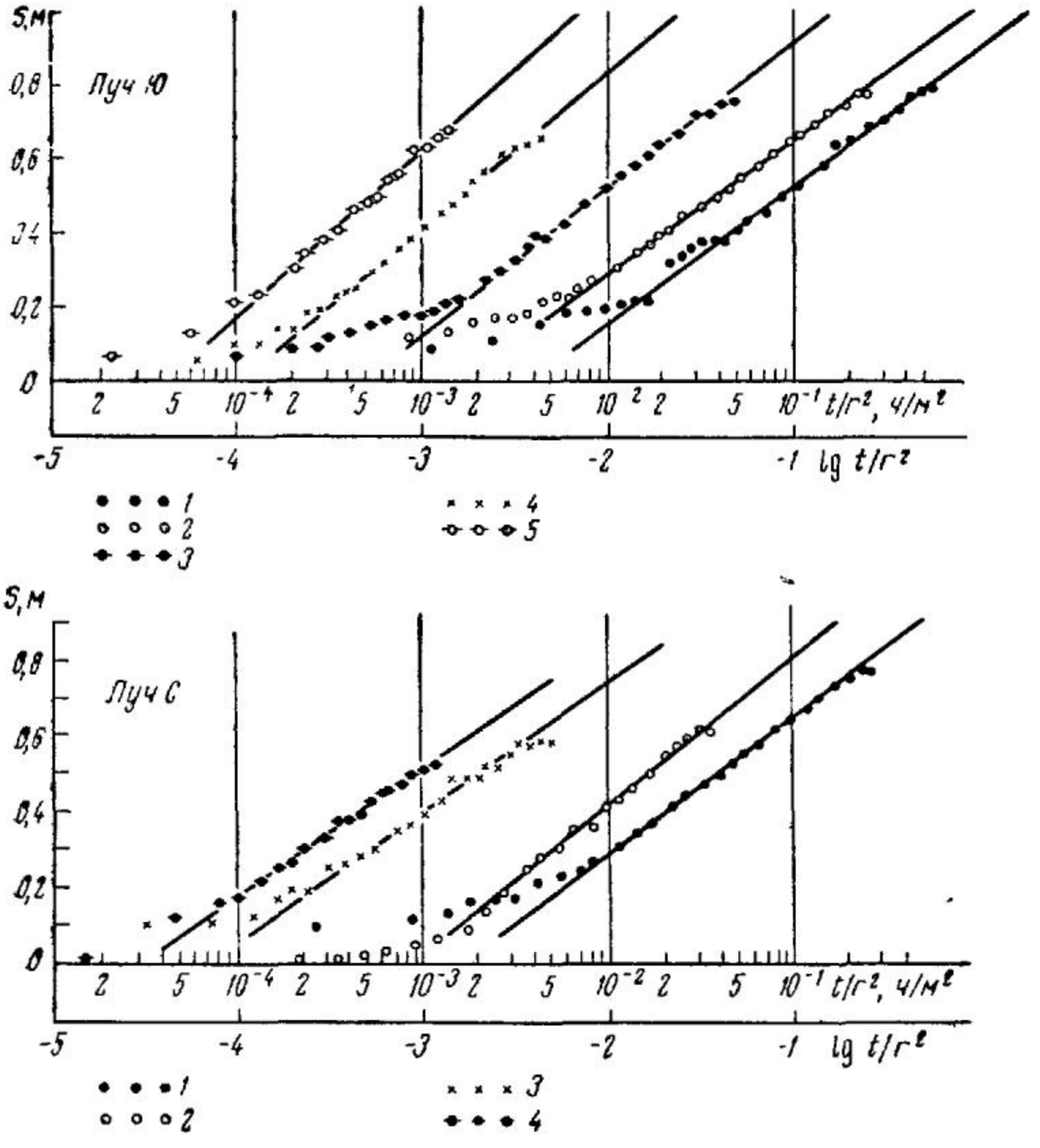



Рис. 41. Графики комбинированного прослеживания понижения по кусту 40:

**Луч Ю** при расстояниях *r* наблюдательных скважин: *1* — 40 м, *2* — 60 м, *3* — 140 м, *4* — 473 м, *5* — 800 м; **луч С** при расстояниях *r* наблюдательных скважин: *1* — 60 м, *2* — 120 м, *3* — 430 м, *4* — 900 м

| Луч | № наблюдательной скважины | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km=\frac{0{,}183Q}{C}$ | $A$ | lg $a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ю | 11 | 2541 | 0,378 | 1232 | 0,915 | 2,07 | $2{,}8\cdot10^{2}$ |
| | 41 | | 0,37 | 1260 | 1,035 | 2,45 | $6{,}8\cdot10^{2}$ |
| | 43 | | 0,405 | 1150 | 1,32 | 2,91 | $1{,}98\cdot10^{3}$ |
| | 60 | | 0,425 | 1090 | 1,68 | 3,61 | $9{,}8\cdot10^{3}$ |
| | 20 | | 0,46 | 1010 | 2,0 | 4,0 | $2{,}4\cdot10^{4}$ |
| С | 41 | 2541 | 0,37 | 1260 | 1,035 | 2,45 | $6{,}8\cdot10^{2}$ |
| | 44 | | 0,4 | 1162 | 1,235 | 2,74 | $1{,}3\cdot10^{3}$ |
| | 25 | | 0,37 | 1260 | 1,48 | 3,65 | $1{,}1\cdot10^{4}$ |
| | 13 | | 0,37 | 1260 | 1,63 | 4,05 | $2{,}7\cdot10^{4}$ |

Таблица 11

| Название участка. Водовмещающие породы | № куста | № наблюдательной скважины | $r$, м | Время выхода графика на асимптоту $\tau + t_к$ | Контрольное время $t_к$, ч | Время запаздывания $\tau$, ч |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ишимский (Казахстан). Песчаник | 1018 | 1019 | 64 | 180 | 7 | 173 |
| | | 1026 | 31 | 200 | 2,6 | 197 |
| | | 1020 | 30 | 160 | 0,04 | 160 |
| Беркутинский (Казахстан). Закарстованные известняки и доломиты | 426 | 244 | 38 | 26 | 32 | Практически отсутствует |
| | | 404 | 190 | 28 | 33 | |
| | | 408 | 133 | 28 | 32 | |
| | | 409 | 175 | 28 | 38 | |
| | | 425 | 136 | 45 | 38 | 7 |
| | 428 | 244 | 111 | 40 | 33 | 7 |
| | | 408 | 48 | 31 | 12 | 19 |
| | | 409 | 48 | 28 | 11 | 17 |
| | | 424 | 29 | 17 | 12 | 5 |
| Сухарышский (Урал). Закарстованные известняки | 102—57 —72 | 83 | 14 | 120 | 0,03 | 120 |
| | | 102 | 13 | 108 | 0,03 | 108 |
| | | 113 | 25 | 108 | 0,1 | 108 |
| Ступинский (Московский артезианский бассейн). Закарстованные известняки | 7 | 1 | 390 | 40 | 1,8 | 38 |
| | | 8 | 320 | 42 | 4,9 | 37 |
| | | 83 | 660 | 56 | 21 | 35 |
| Розентальский (Саксонская Швейцария). Кварцевые песчаники | 42 | 52 | 140 | 0,17 | 0,02 | Практически отсутствует |
| | | 1017 | 220 | 0,57 | 0,05 | |
| | 53 | 1017 | 180 | 1,5 | 0,17 | |
| Кемеровский. Красноцветные песчаники | 46 | 41 | 180 | 15 | 0,24 | 15 |
| Мийкайнарский (Казахстан). Закарстованные известняки | 35 | 50 | 50 | 400 | 2,7 | 397 |
| | | 48 | 70 | 370 | 5,3 | 365 |
| | | 49 | 100 | 340 | 11 | 329 |
| | | 47 | 120 | 300 | 16 | 284 |
| | | 51 | 294 | 300 | 94 | 206 |
| | | 46 | 404 | 300 | 177 | 123 |
| | 40 | 11 | 40 | 33 | 0,29 | 33 |
| | | 41 | 60 | 90 | 0,65 | 89 |
| | | 43 | 140 | 90 | 3,6 | 86 |
| | | 44 | 120 | 22 | 2,6 | 19 |
| | | 25 | 431 | 42 | 33,6 | 8 |
| | | 60 | 473 | 46 | 40,4 | 6 |
| Уральский. Порфириты | 225 | 158 | 30 | 4,3 | 2,9 | 1,4 |
| | | 162 | 30 | 5,8 | 2,9 | 2,9 |
| Окский. Калуга (Московский артезианский бассейн). — Закарстованные известняки | 152610—152611—152612 | 152284 | 580 | 250 | 13 | 237 |
| | | 152283 | 1290 | 250 | 27 | 223 |

В трещинных средах, характеризующихся одной системой пустотности или двумя, но с близкими фильтрационными свойствами, расчет параметров в условиях наличия границ производится, как и в обычных пористых пластах.

При анализе опытных закономерностей изменения уровня при откачках из трещиноватых и закарстованных пород важной для обоснования правильной интерпретации опытных данных является величина времени запаздывания τ. Практически ее достоверное определение в процессе опыта не представляется возможным. Поэтому определенный интерес имеют ориентировочные значения τ. снятые с реальных временных графиков при опробовании трещинных и трещинно-карстовых горизонтов на отдельных участках (табл. 11).

Из табл. 11 следует, что время запаздывания меняется в широких пределах, достигая 300—400 ч. Часто оно практически отсутствует. Отсутствие периода запаздывания, а следовательно, и эффекта «двойной пористости», наблюдается в тех случаях, когда опробуемая среда характеризуется одной системой пустотности или даже двумя, но с близкими значениями проницаемости. Практическое отсутствие времени запаздывания по отношению к принятой пьезопроводности может иметь место и тогда, когда форма графиков отражает эффект «двойной пористости» из-за приближенности расчета пьезопроводности. Следует иметь в виду, что при расчете τ таким способом (по разнице между временем выхода графика на асимптоту и контрольным временем) величина его может оказаться завышенной, что связано с возможностью завышения коэффициента пьезопроводности и, следовательно, занижения контрольного времени.

Приведенные в табл. 11 данные свидетельствуют также о том, что получение асимптотических участков графиков в большинстве случаев вполне достижимо за практикуемое время опытных откачек.

## 3. ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ В ПОРОДАХ С РЕЗКО НЕРАВНОМЕРНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТЬЮ

В предыдущих разделах данной главы были рассмотрены условия, когда объемная интенсивность трещиноватости пород [104] относительно равномерна и достаточно высока, т. е. те случаи, когда трещиноватая порода может рассматриваться как среда, обладающая непрерывными свойствами. В таких условиях предполагалось, что конфигурацией и размерами отдельных трещин можно пренебречь.

Во многих случаях, особенно в пределах древних щитов и массивов эффузивных, интрузивных и метаморфических пород, важную роль играют отдельные относительно редкие крупные тектонические трещины, открытые разломы, зоны дробления, обладающие весьма высокими фильтрационными свойствами и являющиеся основными проводниками подземных вод. К таким породам приурочены так называемые трещинно-жильные воды. В этих условиях размерами и конфигурацией отдельных трещин пренебречь нельзя, поскольку фильтрационный поток теряет радиальный характер (см. рис. 30, *в*).

Однако подход к расчету фильтрации, основанный на конкретном учете конфигурации и степени раскрытия отдельных крупных трещин в большинстве случаев неприменим, поскольку, с одной стороны, конфигурация, размеры трещин и их фильтрационные свойства нам обычно неизвестны, а с другой стороны, закономерности их изменения настолько сложны, что математические трудности расчета фильтрации в этих условиях становятся трудно преодолимыми.

Влияние крупных трещин достаточно часто четко проявляется при откачках в следующих формах:

1) понижения уровня в двух раэноудаленных от опытной и расположенных по одному направлению вдоль трещины (разлома) наблюдательных скважинах весьма близки между собой или даже одинаковы;

2) понижение уровня в дальней скважине больше, чем в ближней, хотя скважины расположены по одному лучу;

3) в скважинах, расположенных на разных лучах на одном расстоянии от опытной, понижения уровня по абсолютной величине различаются на порядок и более.

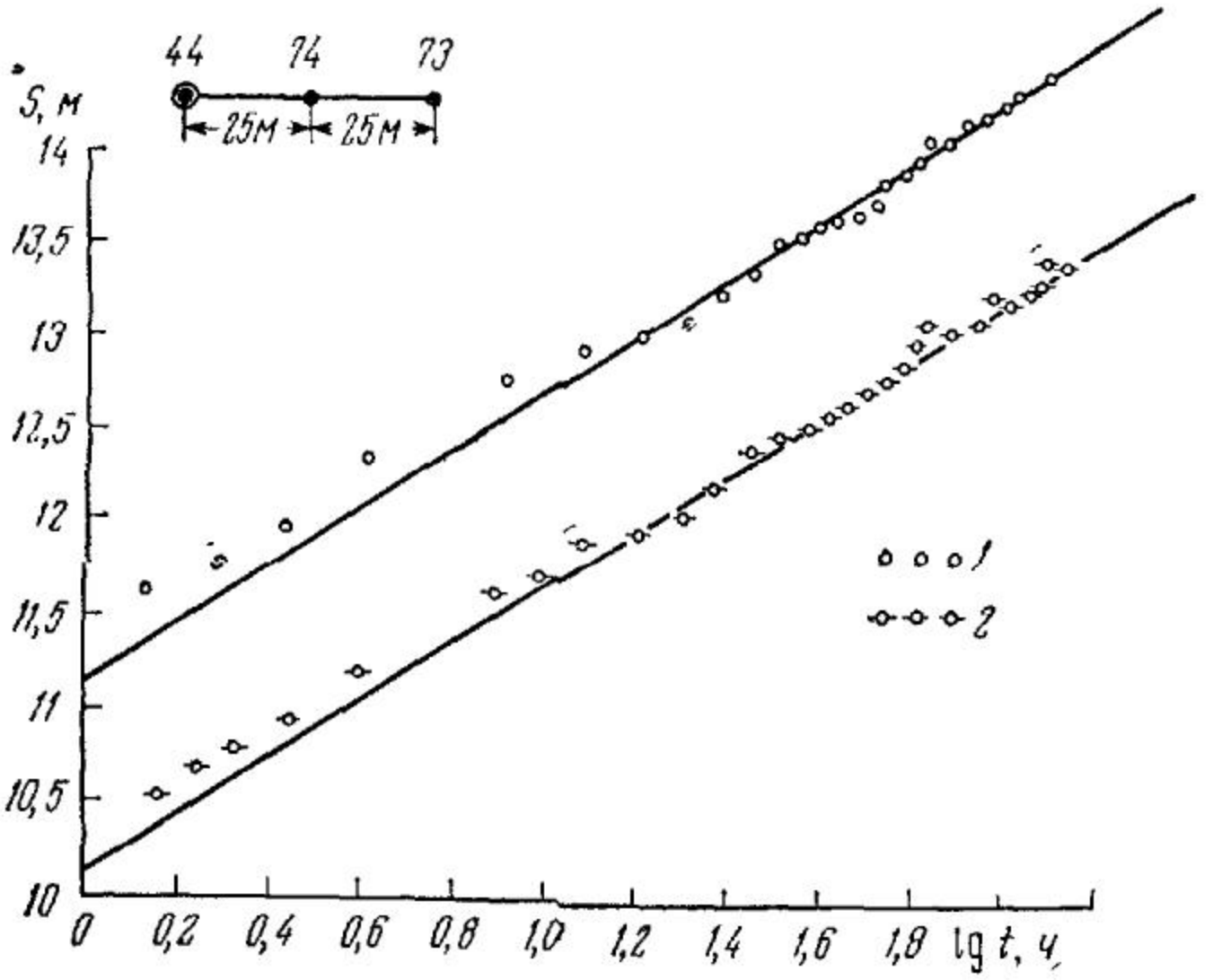
Характерные в этом отношении результаты для первых двух случаев наблюдались при откачках иэ сильно метаморфизованных пород архея в районе г. Щучинск Кокчетавской области (по данным Склярова В. Г.). Схемы кустов и опытные закономерности изменения уровня представлены на рис. 42.

Откачка из скважины 44 ($Q = 7$ л/сек). По одному лучу на расстояниях 25 и 50 м от опытной расположены две наблюдательные скважины 74 и 73. Понижения уровня в них на конец откачки составили соответственно 13,16 и 14,43 м, т. е. в дальней понижение было больше, чем в ближней. Как видно из этих результатов, дальняя скважина попала в более крупную трещину, а ближняя — в ее оперяющую. Неравномерность трещиноватости привела к резкому нарушению радиальности потока.

Откачка из скважины 34 ($Q = 5{,}35$ л/сек). По одному лучу расположены три наблюдательные скважины на расстояниях 25,50 и 150 м от опытной. Понижения уровня соответственно составили 2,03 м; 2,01 и 1,96 м.

В то же время при обеих откачках опытные закономерности снижения уровня во времени имеет одинаковый характер. Результаты расчета параметров приведены в табл. 12.

При обеих откачках были получены близкие значения коэффициента водопроводности по временному прослеживанию. В то же время коэффициенты уровнепроводности значительно отличаются, что связано с резкими различиями в понижениях уровня. Здесь же приведены расчетные понижения на 4-е сутки откачки при коэффициенте пьезопроводности $1{,}5 \cdot 10^4$ м$^2$/сутки, значение которого определено по групповой семимесячной откачке способом, изложенным в главе 8. Из табл. 12 видно, что при откачке из скважины 34 завышенные значения коэффициента уровнепроводности получаются в удалении от опытной скважины на участке, где фактическая кривая



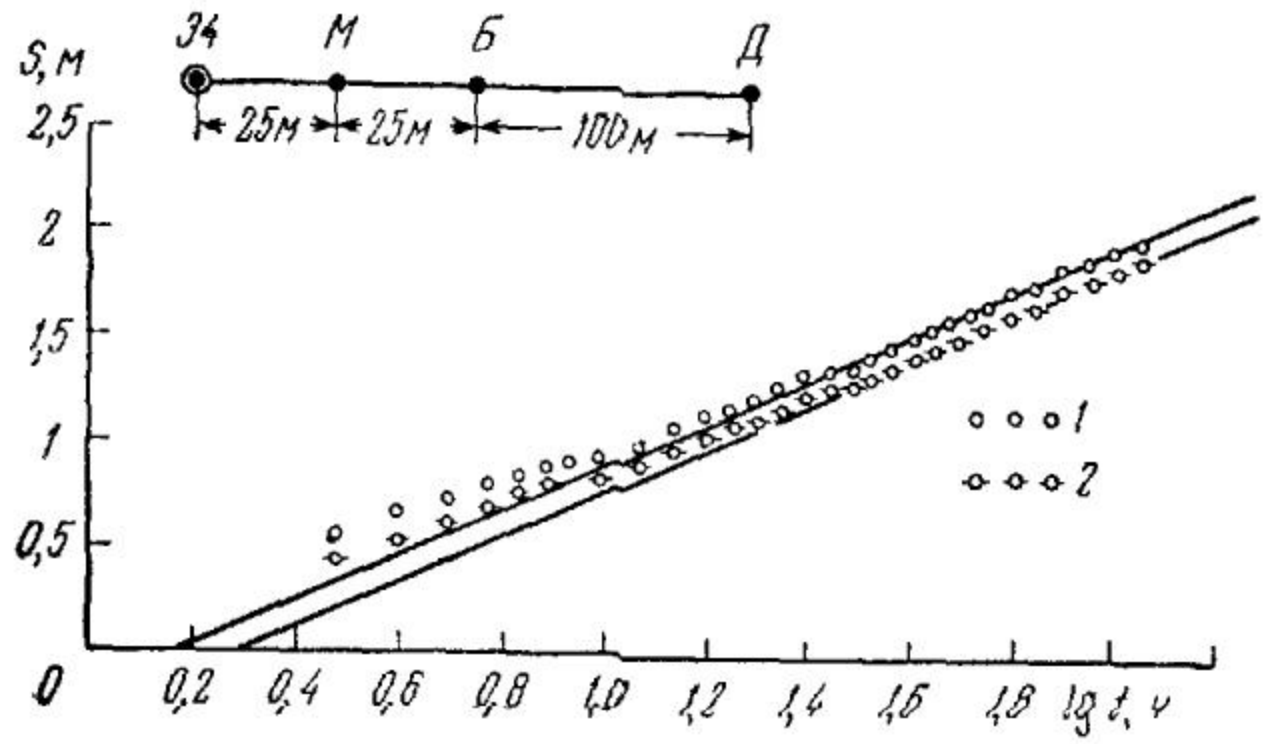




Рис. 42. Графики временного прослеживания понижения при опробовании неравномерно-трещиноватых пород архея (По данным В. Г. Склярова, 1968 г., Северный Казахстан).

*а* — куст 44. *1* — наблюдательная скв. 73: $A = 11{,}15$, $C = 1{,}48$; *2* — наблюдательная скважина 74: $A = 10{,}15$, $C = 1{,}48$; *б* — куст 34. *1* — наблюдательная скважина М, Б: $A = 0{,}17$, $C = 1{,}05$; *2* — наблюдательная скважина Д: $A = 0{,}27$, $C = 10{,}5$.

Таблица 12

| № опытной скважины | Дебит, м³/сутки | № наблюдательной скважины | Расстояние до опытной скважины $r$, м | Понижение уровня $S$, м (при $t = 4$ суток) | Коэффициент водопроводимости м²/сутки | | Коэффициент уровнепроводности $a$, м²/сутки | Расчетное значение при $a = 1{,}5 \cdot 10^4$ м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | по графику $S - \lg t$ | по формуле Дюпюи | | |
| 44 | 601 | 74 | 25 | 13,22 | 74 | — | $5{,}5 \cdot 10^{10}$ | 3,46 |
| | | 73 | 50 | 14,25 | 74 | — | $8{,}5 \cdot 10^{10}$ | 2,56 |
| 34 | 460 | А | 25 | 1,91 | 80 | — | $4{,}7 \cdot 10^{3}$ | 2,44 |
| | | Б | 50 | 1,91 | 80 | 935 | $1{,}86 \cdot 10^{4}$ | 1,83 |
| | | Д | 150 | 1,82 | 80 | 935 | $1{,}86 \cdot 10^{5}$ | 0,82 |

депрессии располагается ниже расчетной, а заниженные, наоборот, вблизи скважины, где фактическая кривая депрессии выше расчетной. Это связано с дренирующим влиянием крупных трещин. Действительно, расчет коэффициента водопроводимости по формуле Дюпюи дал резко завышенный результат (см. табл. 12). В этом случае, однако, нарушением радиальности потока можно пренебречь.

При откачке из скважины 44 фактические понижения оказались существенно больше расчетных, что свидетельствует о том, что основной приток к скважине происходит лишь по нескольким крупным трещинам.

Третий выделенный выше случай, когда нарушение радиальности потока проявляется наиболее характерно, можно иллюстрировать результатами откачки из скважины 215 из трещиноватых эффузивно-осадочных пород ордовика на Обуховском месторождении подземных вод в Кокчетавской области (по данным Б. В. Свиркова).

Опытный куст состоял из двух взаимноперпендикулярных лучей по две скважины в каждом, расположенные на расстояниях 25 и 50 м от опытной.

Один луч расположен вдоль крупной трещины или зоны дробления, второй — в слабо трещиноватых породах. Дебит скважины 6 л/сек. Понижения уровня соответственно: по скважинам, вскрывшим крупную трещину, 16,61 и 12,35 м; по скважинам, вскрывшим слабо проницаемые породы, 0,61 и 0,30 м. Как видно, разница в понижениях уровня в скважинах, вскрывших малопроницаемые породы и трещину, существенно отлична и составляет соответственно 0,31 и 4,26 м. Это свидетельствует о том, что основное количество воды поступает к скважине по вскрытой трещине. Действительно, если рассчитать величину $km$ по формуле Дюпюи, то по скважинам, вскрывшим трещину, она оказывается 13 м$^2$/сутки, а в малопроницаемых блоках 185 м$^2$/сутки, что полностью противоречит результатам, полученным при прокачках соответствующих скважин. Если же рассчитать водопроводимость трещинной зоны по скважинам, вскрывшим трещину, рассматривая поток в ней как плоскопараллельный и пренебрегая притоком из слабопроницаемых зон, то с учетом двухстороннего притока к дрене при ширине потока (трещины) 10 м $km = 1530$ м$^2$/сутки (или 765 м$^2$/сутки при ширине потока 20 м).

Следовательно, в данных условиях нарушением радиальности потока пренебречь нельзя, так как расстояния между трещинами и их размеры достаточно велики и сопоставимы с расстояниями между скважинами.

В других случаях (откачка из скв. 34) расчет по скважинам, попавшим в крупную трещину, может дать резко завышенное значение водопроводимости, характеризующее по существу проницаемость трещины. Последняя связана с проницаемостью пласта следующим соотношением (104):

$$K = K_{тр} \cdot n. \qquad (6.6)$$

где $K$ и $K_{тр}$ — коэффициенты фильтрации пласта и трещины; $n$ — пористость.

Если одна из скважин попала в слабопроницаемый блок, а вторая в трещину, значение водопроводимости будет резко занижено. При вскрытии обеими скважинами слабопроницаемых пород водопроводимость пласта может оказаться существенно завышенной.

Очевидно, что в рассматриваемых условиях определение параметров на основе площадного прослеживания изменения уровней при небольшом числе точек практически невозможно. Однако в ряде случаев можно воспользоваться общим графиком $S/Q$ — $\lg r$ (см. главу 3), когда за счет большого числа точек, несмотря на их рассеяние, удается провести осредняющую линию.

Если водозаборную скважину и связанные с ней крупные трещины рассматривать как некоторую «обобщенную» каптажную систему типа лучевого водозабора с приведенным радиусом $r_{опр}$, то, как и при работе любого водозабора, через определенное время в некоторой окрестности системы (скважина—трещина) должен наступить квазистационарный режим, после чего темп снижения уровня будет определяться лишь фильтрационными свойствами основного объема пород независимо от распределения и конфигурации крупных трещин. Последние будут определять только абсолютную величину понижений уровня в водозаборных (опытных) и наблюдательных скважинах.

Здесь как и в обычных трещиноватых пластах, коэффициент водопроводимости может быть определен после наступления квазистационарного режима способом временного прослеживания (или комбинированного). Это хорошо видно на примере откачек из скважин 34 и 44, где водопроводимость, определенная по временным графикам, оказалась практически одинакова.

Поскольку время наступления квазистационарного режима может быть достаточно большим наилучшие результаты для определения коэффициентов водопроводимости в резко неравномерно трещиноватых пластах дают данные длительных опытно-эксплуатационных откачек с интенсивным водоотбором. При этом получаются осредненные или эффективные значения коэффициента водопроводимости трещиноватых пород для значительной площади, охваченной воронкой депрессии.

Определение коэффициента пьезопроводности таким путем практически невозможно (см. табл. 12), так как неизвестны не только приведенный радиус обобщенной каптажной системы, но и расстояния от наблюдательных скважин до трещин, которые мы рассматриваем как элементы возмущающей системы. Это связано с тем, что абсолютные понижения уровней в наблюдательных скважинах могут существенно отличаться от тех, которые должны были бы иметь место в эквивалентном однородном пласте.

В ряде случаев для расчета работы взаимодействующих скважин можно использовать, подобно тому как это делается в нефтяной практике, комплексный гидравлический параметр $\frac{a}{r^2}$.

При этом для каждой точки, в которой производится прогноз снижения уровня, этот параметр должен определяться отдельно.

Рассмотренные в данном разделе условия можно охарактеризовать как крайний предельный случай среды с «двойной пористостью».

Естественно, что в таких условиях время запаздывания может быть очень велико. Поэтому в ряде случаев достижение квазистационарного режима оказывается практически невозможным, а следовательно, задача определения параметров по данным опытных работ — по существу, невыполнимой.

## 4. ВОДОНОСНЫЕ ГОРИЗОНТЫ В АНИЗОТРОПНЫХ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОДАХ

В работах Е. М. Смехова, Е. С. Ромма и других исследователей [104, 113, 114] показано, что в формировании общей трещиноватости горных пород ведущую роль играют тектонические трещины. Их характерными чертами являются системность и определенная ориентация в пространстве. Чаще всего ориентировка более крупных трещин совпадает с простиранием пород. Поэтому для трещиноватых горных пород характерна анизотропия их фильтрационных свойств.

В плане определения расчетных гидрогеологических параметров с учетом анизотропии горных пород наибольший интерес представляет *однородная прямолинейная* анизотропия, когда направление главных осей не меняется при изменении координат и свойства среды остаются неизменными от точки к точке.

В случае неоднородной криволинейной анизотропии она должна быть сведена к однородной прямолинейной, иначе возможности расчета параметров ограничены так же, как и в условиях резкой неравномерной трещиноватости.

Основным методом решения фильтрационных задач в анизотропных породах является метод изотропирующей деформации пространства [97]. Путем подстановки $y_i = \text{const}\ x_i K_i^{1/2}$ уравнение фильтрации в анизотропной среде приводится к уравнениям для изотропной.

Решение дифференциального уравнения неустановившейся фильтрации в пласте с прямолинейной однородной анизотропией получено И. К. Гавич для условий радиального потока при трансформации одной из осей координат в виде [34]:

$$S = \frac{Q}{4\pi h \sqrt{K_x \cdot K_y}} \left[ -E_i \left( \frac{(r')^2}{4a_y t} \right) \right], \tag{6.7}$$

где $K_x$ и $K_y$ — коэффициенты фильтрации по главным осям координат $x$ и $y$;

$r'$ — радиус-вектор в системе координат $x$ и $y$,

$$r' = \sqrt{y^2 + \frac{K_y}{K_x} \cdot x^2}. \tag{6.8}$$

Таблица 13

| Положение скважин | Способ обработки и координаты графиков: Временнбе прослеживание $S - \lg t$ | Площадное прослеживание $S - \lg r$ | Комбинированное прослеживание $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | № формулы в тексте |
|---|---|---|---|---|
| Независимо от местоположения | $\sqrt{K_x K_y} = \frac{0{,}183Q}{hC}$ | $\sqrt{K_x K_y} = \frac{0{,}366Q}{hC}$ | $\sqrt{K_x K_y} = \frac{0{,}183Q}{hC}$ | 6.14 |
| Ось $y$ | $\lg a_y = 2\lg r_y - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $\lg a_y = \frac{2A}{C} - 0{,}35 - \lg t$ | $\lg a_y = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | 6.15 |
| Ось $x$ | $\lg \frac{K_y}{K_x} = \lg a_y + 0{,}35 - \frac{A}{C} - 2\lg r_x$ | $\lg \frac{K_y}{K_x} = \lg a_y + 0{,}35 - \frac{2A}{C} + \lg t$ | $\lg \frac{K_y}{K_x} = \lg a_y + 0{,}35 - \frac{A}{C}$ | 6.16 |
| Ось $x$ | $\lg a_x = 2\lg r_x - 0{,}35 + \frac{A}{C}$ | $\lg a_x = \frac{2A}{C} - 0{,}35 - \lg t$ | $\lg a_x = \frac{A}{C} - 0{,}35$ | 6.17 |
| Ось $y$ | $\lg \frac{K_x}{K_y} = \lg a_x + 0{,}35 - \frac{A}{C} - 2\lg r_y$ | $\lg \frac{K_x}{K_y} = \lg a_x + 0{,}35 - \frac{2A}{C} + \lg t$ | $\lg \frac{K_x}{K_y} = \lg a_x + 0{,}35 - \frac{A}{C}$ | 6.18 |

При этом принимается, что объемная интенсивность трещиноватости (или водоотдача) остается постоянной независимо от выбранного направления:

$$\frac{K_x}{a_x} = \frac{K_y}{a_y}, \tag{6.9}$$

где $a_x$ и $a_y$ — коэффициенты пьезопроводности по разным осям анизотропии.

Аналогичное выражение, но при трансформации обеих осей координат получено Е. С. Роммом [104].

Как и в обычном изотропном пласте, при условии $\frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}1$ экспоненциальная функция может быть заменена логарифмической. Тогда выражение (6.7) при условии трансформации оси $x$ может быть записано в виде:

$$S = \frac{Q}{4\pi h \sqrt{K_x \cdot K_y}} \ln \frac{2{,}25 \cdot a_y t}{(r')^2}. \tag{6.10}$$

Выражение (6.10) показывает, что в анизотропном пласте в условиях квазистационарной фильтрации темп снижения уровня не зависит от направления и определяется среднегеометрическим значением коэффициента фильтрации, который можно рассматривать как его эффективную величину:

$$K_{ср} = \sqrt{K_x K_y}. \tag{6.11}$$

Величина понижения уровня в анизотропном пласте зависит от положения точки, в которой определяется понижение, по отношению к возмущающей скважине и главным осям анизотропии.

Учитывая равенство (6.8), выражения для понижения уровня на главных осях анизотропии принимают вид [34]:

на оси $y$ ($r' = r_y$)

$$S_y = \frac{Q}{4\pi h \sqrt{K_x \cdot K_y}} \cdot \ln \frac{2{,}25 a_y t}{r_y^2}; \tag{6.12}$$

на оси $x$ $\left(r' = r_x \frac{K_y}{K_x}\right)$

$$S_x = \frac{Q}{4\pi h \sqrt{K_x \cdot K_y}} \cdot \ln \frac{2{,}25 a_y t}{r_x^2 \frac{K_y}{K_x}}. \tag{6.13}$$

Таким образом, в пластах с прямолинейной неоднородной анизотропией основные расчетные параметры $K_x (K_x h)$; $K_y (K_y h)$; $a_x$ и $a_y$ могут быть определены способом Джейкоба с использованием всех трех его модификаций. Расчетные формулы приведены в табл. 13.

Для определения параметров с использованием всех модификаций способа Джейкоба необходимо иметь на каждой главной оси анизотропии $x$ и $y$ не менее трех наблюдательных скважин. В противном случае может быть использован только способ временного прослеживания.

Порядок расчета применительно к условиям записи выражений (6.12) и (6.13) следующий (трансформация оси $x$): по графикам временного, площадного или комбинированного прослеживания для скважин, расположенных на оси $y$, определяются величины $\sqrt{K_x K_y}$ и $a_y$; затем по скважинам, расположенным на оси $x$, определяется значение $\frac{K_y}{K_x}$; после этого определяются остальные параметры анизотропного пласта $K_x$, $K_y$ и $a_x$ с учетом условия (6.9).

Аналогично могут быть определены параметры при трансформации оси $y$, сначала $\sqrt{K_x K_y}$, $a_x$ (по скважинам на оси $x$), а затем $\frac{K_x}{K_y}$ по скважинам на оси $y$.

Расчеты параметров могут быть выполнены без учета трансформации осей координат в следующем порядке: по скважинам, расположенным на оси $y$, определяются $a_y$ и $\sqrt{K_x K_y}$; по скважинам, расположенным на оси $x$, определяются $a_x$ и $\sqrt{K_x K_y}$; при известном значении $\sqrt{K_x K_y}$ с учетом (6.9) находятся $K_x$ и $K_y$ по зависимостям:

$$\left.\begin{aligned} \sqrt{K_x \cdot K_y} = \alpha;\ \sqrt{\frac{K_x}{K_y}} = \beta \\ K_y = \frac{\alpha}{\beta};\quad K_x = \alpha \cdot \beta \end{aligned}\right\} \qquad (6.19)$$

Критерии возможности использования метода Джейкоба такие же, как и в обычных изотропных пластах. Дополнительным критерием наступления квазистационарного режима является параллельность временных, площадных и комбинированных графиков по скважинам, расположенным на разных лучах.

Если трещиноватый анизотропный пласт характеризуется «двойной пористостью», то при расчете параметров следует использовать все рекомендации, изложенные в разделе 2.

Критерием необходимости учета анизотропии при обработке результатов опытных откачек являются вытянутость и эллипсовидная форма воронки депрессии с существенным различием длин полуосей эллипса. Однако вопрос о количественной оценке погрешностей, возникающих при игнорировании анизотропии, в общем случае не решен. Поэтому возможная погрешность должна оцениваться в каждом конкретном случае, после чего можно установить необходимость учета анизотропии.

Рассмотрение условий движения подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах и анализ результатов опытных работ при их опробовании на различных участках с различным строением и составом водовмещающих пород позволяют сделать следующие выводы.

1. Трещиноватые и закарстованные породы в большинстве случаев характеризуются двойной природой пустотности, что приводит к изменению эффективной водоотдачи в процессе опытов.

В связи с этим асимптотические участки опытных закономерностей изменения уровня, которые могут быть аппроксимированы уравнением Тейса — Джейкоба, формируются с некоторым запаздыванием τ по сравнению с обычными зернистыми пластами, так же как это имеет место в безнапорных водоносных горизонтах при эффекте Болтона. Время запаздывания выхода графиков на асимптотический участок изменяется в широких пределах и является величиной практически непрогнозируемой.

2. Выбор расчетных участков временных и комбинированных графиков производится по существу на основе качественного анализа опытных закономерностей изменения уровней в процессе откачек, так как критерий контрольного времени в данных условиях неприменим.

3. Наилучшие результаты при диагностировании расчетных участков графиков дает комбинированное прослеживание. Комбинированные графики в зависимости от структуры трещинной или трещинно-карстовой среды и соотношения фильтрационных и емкостных свойств различных типов пустот могут быть представлены:

а) общим полулогарифмическим графиком, формирующимся по существу без запаздывания (эффект «двойной пористости» отсутствует или практически не проявляется);

б) графиками, аналогичными графиками Болтона, с общим асимптотическим участком, формирующимся с запаздыванием;

в) семейством графиков с параллельными асимптотическими участками, формирующимися с запаздыванием.

Обработка результатов опытов в первых двух случаях производится так же как в обычных зернистых средах. При этом результаты определения параметров по временным (комбинированным) и площадным графикам совпадают.

В последнем случае расчет по площадным графикам дает завышенные результаты, причем завышение может быть многократным. Такие графики характерны для интенсивно трещиноватых и закарстованных пород.

Параллельность комбинированных графиков может возникать и за счет проявления дополнительного питания, например, на приречных участках. В этом случае расчеты по ним дают завышенные результаты по сравнению с расчетами по площадным графикам (см. главу 8).

Следовательно, совпадение результатов определения параметров площадным и временным способами является возможным, но не обязательным случаем при обработке результатов опробования трещинных сред.

В таких случаях, как правило, следует при выборе расчетных параметров отдавать предпочтение более низким значениям. Это связано с тем, что влияние всех отмеченных факторов ведет к завышению рассчитанных параметров.

Последний случай является наиболее сложным для интерпретации, поскольку для него отсутствует способ контроля.

4. В пластах с резко неравномерной трещиноватостью в связи с возможным нарушением радиальности потока коэффициенты водопроводимости могут быть получены лишь по временным и комбинированным графикам. Однако время достижения квазистационарного режима может оказаться очень большим. Площадное прослеживание уровня, как правило, неприменимо, лишь в отдельных случаях удается использовать общий график $S/Q$ — $\lg r$. В этих условиях невозможно также определение действительного коэффициента пьезопроводности.

5. Определение параметров анизотропных пластов может быть выполнено обычными методами, но с учетом искажения формы потока. Поэтому все графики следует строить раздельно для скважин, расположенных на разных осях анизотропии.

6. В связи с запаздыванием формирования асимптотических участков для анализа степени влияния границ критерий приведенного расстояния ($r$) может быть использован лишь при небольших значениях $\tau$. Факт влияния границ может дополнительно устанавливаться по началу появления аномального участка, которое будет зависеть от положения скважины относительно границы, что не наблюдается при влиянии «двойной пористости».

Глава 7

# ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ СЛОИСТЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ

В реальных природных условиях наиболее широкое распространение имеют следующие типы слоистых разрезов:

1) слоистые толщи без разделяющих прослоев;

2) слоистые толщи с глинистыми разделяющими слоями значительной мощности;

3) слоистые толщи, представленные чередованием относительно маломощных проницаемых или слабопроницаемых прослоев.

Как было показано в главе 1, в слоистых толщах определенное влияние на формирование закономерностей режима подземных вод при опытных откачках могут оказывать процессы перетекания подземных вод через слабопроницаемые отложения. В процессе эксплуатации количество воды, поступающей из смежных с используемым водоносных горизонтов, в ряде случаев может составлять существенную долю в эксплуатационных запасах.

В связи с этим в прогнозных расчетах по оценке эксплуатационных запасов требуется учитывать перетекание воды из смежных горизонтов. Для учета этого процесса как для двухслойной, так и для многослойных толщ, имеются соответствующие аналитические решения [161, 31]. Для их использования необходимы, кроме основных параметров водоносных горизонтов, рассмотренных в предыдущих главах, гравитационная водоотдача ($\mu_0$) верхнего водоносного горизонта в двухслойной толще и коэффициент перетекания ($B$) в многослойной.

Коэффициент перетекания является комплексным параметром, зависящим от водопроводимости основного водоносного горизонта и коэффициента фильтрации и мощности разделяющих слабопроницаемых слоев. Этот коэффициент связан с перечисленными параметрами следующей зависимостью:

$$B = \sqrt{\frac{km}{\frac{K_0'}{m_0'} + \frac{K_0''}{m_0''}}}, \qquad (7.1)$$

где $K_0'$ и $K_0''$ — коэффициенты фильтрации соответственно перекрывающих и подстилающих слабопроницаемых слоев;
$m_0'$ и $m_0''$ — мощности слоев.

В главе 1 были рассмотрены закономерности изменения уровней подземных вод в двухслойной толще, когда отсутствуют разделяющие слабопроницаемые слои, и в многослойных толщах, где водоносные горизонты разделены выдержанными слабопроницаемыми слоями. Там же было показано, что в условиях двухслойной толщи влияние перетекания из верхнего горизонта сказывается практически с самого начала откачки. В то же время процессы перетекания в многослойной толще через слабопроницаемые прослои обычно за период опытных работ проявляются в достаточно ограниченных случаях. При этом для изучения процессов взаимодействия водоносных горизонтов требуется проведение специальных опытных работ продолжительностью до 30—40 суток, а иногда и более.

Объективная сложность получения параметров перетока заставляет очень часто пренебрегать ими при подсчете эксплуатационных запасов и рассматривать пласт как изолированный. В этом случае используются лишь основные параметры опробуемого пласта, которые можно определять методом Джейкоба. При обработке опытных данных в слоистых толщах методом Джейкоба для изолированных пластов возникает обратная задача — диагностирование начальных участков опытных закономерностей, заключающих ограниченную информацию с пренебрежимо малым влиянием перетока.

Вероятность случаев, когда эффект перетока проявляется в полной мере или недостаточно, в настоящее время практически непрогнозируема. Поэтому вопрос о методах обработки может решаться в зависимости от вида конкретных опытных закономерностей изменения уровня. В тех случаях, когда эффект взаимодействия слоев достаточен, обработку следует производить на основе строгих решений, учитывающих процессы перетекания.

Кроме перечисленных типов гидрогеологических разрезов (двухслойной толщи и многослойной толщи с выдержанными слабопроницаемыми слоями), в практике разведочных работ встречаются слоистые толщи, представленные чередованием невыдержанных относительно маломощных проницаемых и полупроницаемых прослоев.

Все три типа гидрогеологического разреза обусловливают некоторые специфические особенности опытных закономерностей изменения уровня. Однако общим для них является наличие одного или двух диапазонов времени, в которые закономерности изменения уровня описываются уравнением Тейса — Джейкоба. Один из этих диапазонов относится к началу возмущения, второй — к более позднему периоду времени. Это обстоятельство создает принципиальную возможность применения метода Джейкоба для обработки опытных данных и в этих условиях. Поэтому возникает вопрос о пределах его применимости, который будет рассмотрен в настоящей главе.

В этой главе будет рассмотрена также методика обработки и интерпретации данных опытных работ в тех случаях, когда процессы

перетекания оказывают значительное влияние на опытные закономерности и кроме основных параметров требуется определение специфических, характеризующих условия перетекания.

Кроме типа гидрогеологического разреза, существенное значение имеет характер опробования. В данном случае имеется в виду раздельное и суммарное опробование водопроницаемых прослоев. Дальнейшее изложение производится в соответствии с характером опробования и типом разреза.

## 1. РАЗДЕЛЬНОЕ ОПРОБОВАНИЕ ВОДОНОСНЫХ ПРОСЛОЕВ

Здесь рассматриваются случаи раздельного и изолированного вскрытия отдельных относительно хорошо проницаемых прослоев, причем фильтры возмущающей и всех наблюдательных скважин располагаются во вскрытом прослое.

### Двухслойная толща

Наиболее типичным случаем двухслойной толщи являются условия, в которых опробуемый горизонт, характеризующийся высокой проницаемостью и небольшой водоотдачей, перекрывается менее проницаемым водоносным горизонтом, но с более высокой водоотдачей. Оба горизонта обычно имеют общий уровень (свободный — в верхнем и напорный — в нижнем горизонтах).

Как уже указывалось (глава 1), характер опытной закономерности изменения уровня аналогичен закономерности для безнапорного водоносного горизонта. Аналогичная эффекту Болтона зависимость объясняется действием вертикальной составляющей потока [86, 133]. Таким образом, кривая изменения уровня во времени состоит из трех участков:

а) первый участок описывается уравнением Тейса или Тейса — Джейкоба с параметрами опробуемого слоя;

б) второй участок — это период ложностационарного режима, описываемый уравнением для перетока при постоянном напоре в соседнем слое;

в) третий участок описывается уравнением Тейса — Джейкоба с коэффициентом водопроводимости опробуемого слоя и водоотдачей верхнего слоя. Таким образом, наиболее представительным является третий участок.

Если опытная закономерность содержит третий участок, то обработка опытных данных производится как для напорного пласта способами временного, площадного или комбинированного прослеживания. В результате при $K_0 \ll K_1$ получают коэффициент водопроводимости опробуемого слоя и коэффициент уровнепроводности $a = \frac{k, m}{\mu_0}$, где $\mu_0$ — гравитационная водоотдача верхнего слоя, $K_0$ и $K_1$ — коэффициенты фильтрации верхнего и нижнего слоев. Прогнозный расчет с использованием этих параметров будет отражать возможности

месторождения наиболее полно. Представительный конечный участок опытной закономерности возникает через отрезок времени от начала возмущения, определяемый неравенством [29, 84]:

$$t \geqslant \frac{5 \cdot \mu_0 \cdot h_{ср}}{K_0}, \tag{7.2}$$

где $K_0$ — коэффициент фильтрации;
$\mu_0$ — водоотдача;
$h_{ср}$ — средняя мощность верхнего слоя.

Численный анализ этого неравенства показывает, что случаи, когда получение представительного участка возможно и когда он не достигается практикуемой продолжительностью откачек, равновероятны. Следовательно, вполне реальны варианты, когда опытная закономерность будет представлена либо первым и третьим участками, либо первым и переходным участками. В этом случае расчетным будет первый, начальный участок.

Обработку опытной информации с использованием начального участка можно производить способами временного, площадного и комбинированного прослеживания так, как это рекомендовано для напорных пластов. В результате можно получить коэффициент водопроводимости и пьезопроводности — параметры опробуемого слоя.

Коэффициент водопроводимости способом площадного прослеживания можно определить и в период ложностационарного режима [82].

Примером месторождений, приуроченных к разрезам первого типа, может служить месторождение Даукара в Кызыл-Кумах. Месторождение приурочено к анизотропной водоносной толще, состоящей из неравномерного чередования тонкозернистых песчаников с прослоями глин. Верхняя часть обводненного разреза мощностью в среднем 20 м обладает в целом меньшей водопроводимостью и большей степенью анизотропии, чем нижняя, значительно более проницаемая часть мощностью 45 м. Произведено кустовое опробование с возмущающей скважиной 3к, с фильтрами в интервале 48—56 и 66—79 м. Наблюдения производились в пьезометрах на средних глубинах 39, 49, 59, 66 и 74 м, т. е. пьезометры располагались в плоскости фильтров и выше нее с интервалом 10 м. Схема расположения пьезометров в плане и на разрезе приведена на рис. 43.

По результатам откачки построена схема изолиний понижений (см. рис. 43), которая обнаруживает преобладание вертикальных линий тока в верхней части разреза и горизонтальных в его нижней части. Эта схема иллюстрирует тот факт, что исследуемый водоносный горизонт работает, как двухслойная толща.

Обработка была произведена способами временного, площадного и комбинированного прослеживания.

Временные графики показаны на рис. 44. Как видно, они однотипны по форме и положительно аномальны, что отвечает реальной фильтрационной схеме. Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности определены по начальным участкам временных графиков

(табл. 14). Для расчетов параметров использованы пьезометры, расположенные в одной горизонтальной плоскости с фильтром возмущающей скважины.

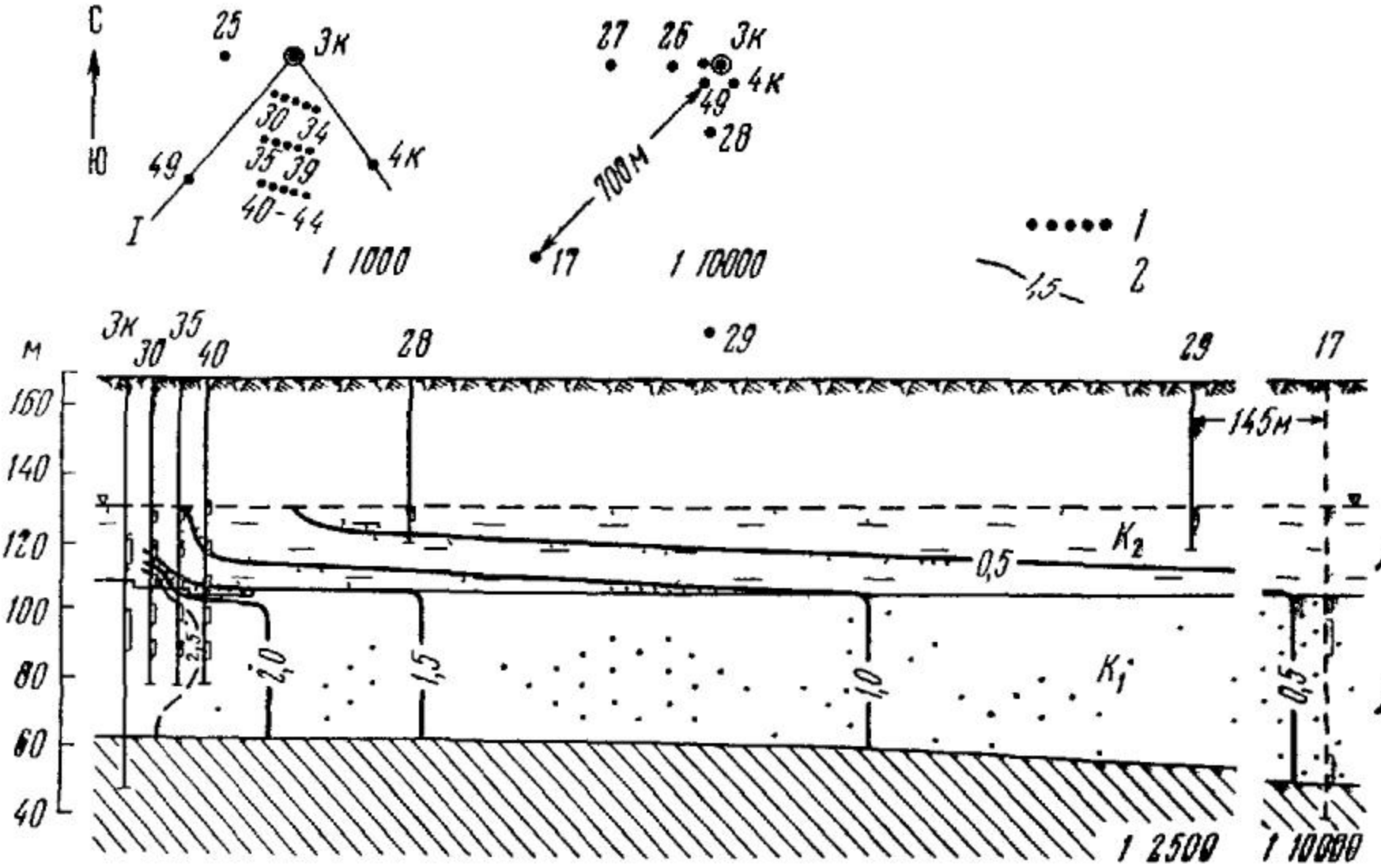



**Рис. 43.** Схематический план и разрез двухслойной толщи при $K_1 \gg K_2$; $\mu_2 \gg \mu_1$ на участке опытного куста 3к (по данным В. Г. Грабовникова, А. М. Слинко, 1969 г., Центральные Кызылкумы):

*1* — положение пьезометров в и плане, *2* — изолинии понижения

Таблица 14

| № наблюдательной скважины | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| 31 | 101 | $5{,}5 \cdot 10^5$ |
| 30 | 104 | $6{,}2 \cdot 10^5$ |
| 25 | 104 | $3{,}7 \cdot 10^5$ |
| 36 | 75 | $8{,}8 \cdot 10^4$ |
| 35 | 98 | $4{,}4 \cdot 10^5$ |
| 40 | 96 | $4{,}5 \cdot 10^5$ |
| 41 | 98 | $4{,}1 \cdot 10^4$ |
| 49 | 99 | $4{,}0 \cdot 10^5$ |
| Среднеарифметическое | 97 | $4{,}1 \cdot 10^5$ |

Графики площадного прослеживания (рис. 45) построены на три момента времени: $t = 0{,}17$; 0,9; 42 суток. Два первых относятся к начальному участку временной закономерности, третий — к концу

откачки, периоду ложностационарного режима. Величины параметров приведены в табл. 15.

Коэффициенты водопроводимости при всех моментах площадного прослеживания равны между собой. Коэффициент пьезопроводности

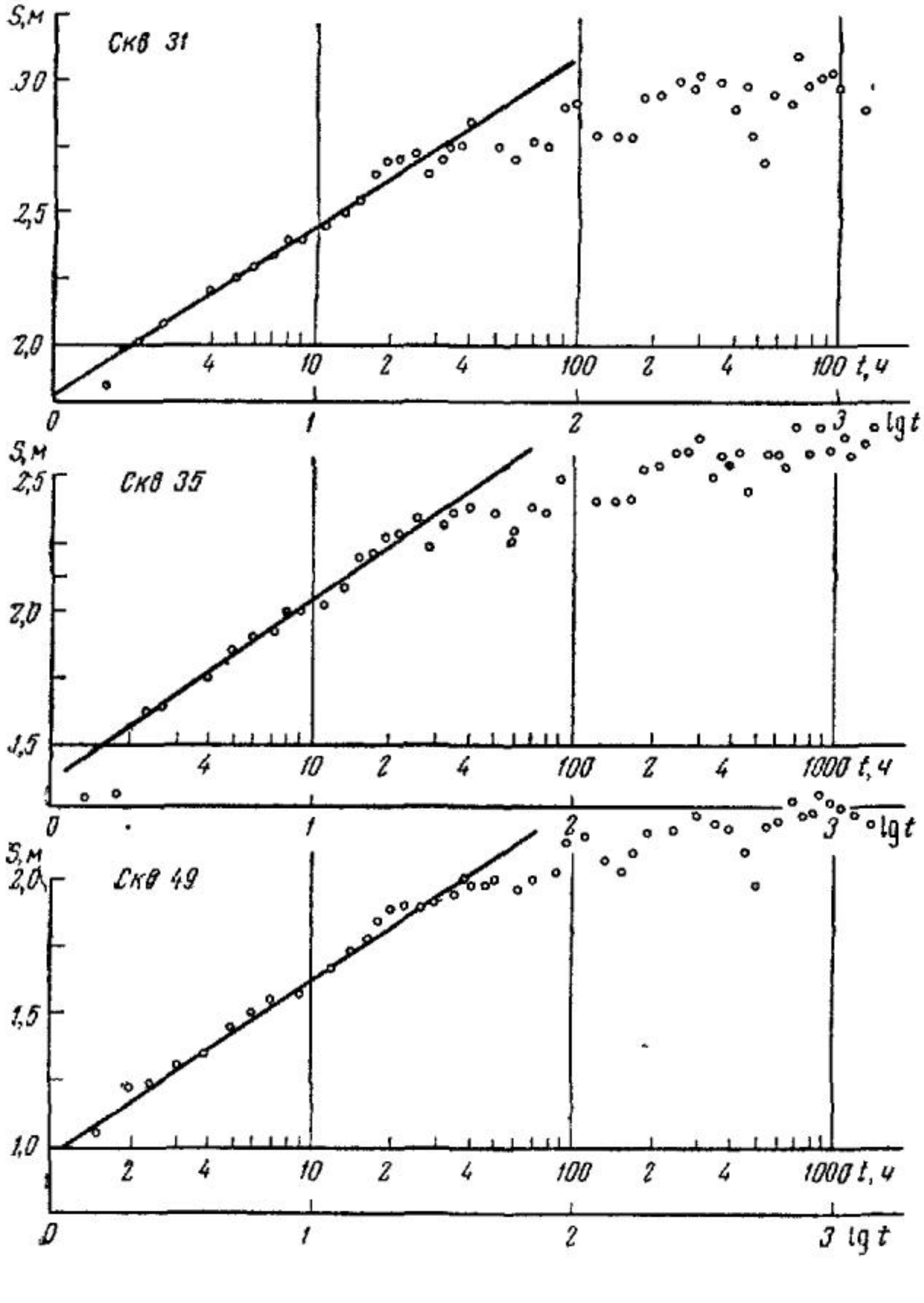



Рис. 44. Графики временного прослеживания понижения при опробовании двухслойиой толщи кустом 3к.

Скв. 31: $r = 10$ м, $km = 101$ м²/сутки, $a = 5{,}5 \cdot 10^5$ м²/сутки; скв 35: $r = 20$ м, $km = 98$ м²/сутки, $a = 4{,}4 \cdot 10^5$ м²/сутки; скв. 49: $r = 36$ м, $km = 99$ м²/сутки, $a = 4 \cdot 10^5$ м²/сутки

для последнего момента, относящегося к ложностационарному режиму, естественно, оказывается заниженным. График комбинированного прослеживания (см. рис. 45) имеет типичную для двухслойной толщи форму. Графики пьезометров, расположенных от возму-

Таблица 15

| $t$, сутки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| 0,17 | 96 | $3{,}8 \cdot 10^5$ |
| 0.9 | 96 | $3{,}8 \cdot 10^5$ |
| 42 | 97 | $2{,}7 \cdot 10^4$ |

щающей скважины на расстоянии до 36 м, имеют общий начальный участок. Конечные участки графиков отходят от общей начальной прямой последовательно по мере удаления от возмущающей

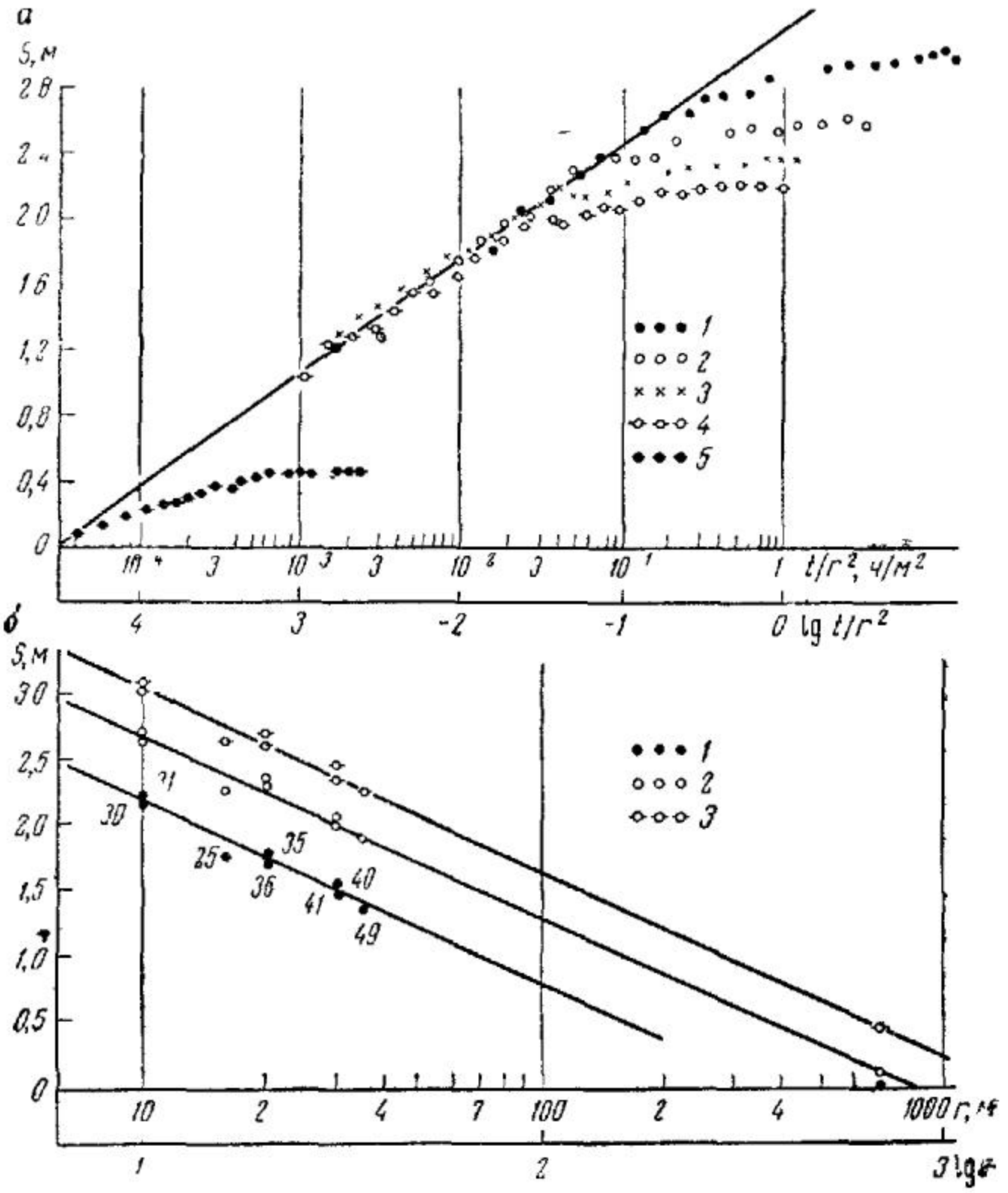



Рис. 45. Графики прослеживания:

а — комбинированного прослеживания понижения для куста 3к — $km$ = = 94 м²/сутки, $a = 3{,}5 \cdot 10^5$ м²/сутки при расстояниях $r$ наблюдательных скважин: *1* — 10 м, *2* — 20 м, *3* — 30 м, *4* — 36 м, *5* — 728 м; *б* — площадного прослеживания на моменты времени $t$: *1* — 4 ч, *2* — 21 ч, *3* — 1000 ч

| $t$, сутки | $Q$, м²/сутки | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | lg $a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,167 | 363 | 1,38 | 96,4 | 3,55 | 5,577 | $3{,}8 \cdot 10^5$ |
| 0,875 | 363 | 1,38 | 96,4 | 4,05 | 5,578 | $3{,}8 \cdot 10^5$ |
| 41,6 | 363 | 1,37 | 97,0 | 4,38 | 4,43 | $2{,}7 \cdot 10^4$ |

скважины. Наблюдательная скв. 17, удаленная на 728 м, не имеет участка, совпадающего с общим графиком.

Форма комбинированного графика, таким образом, подчеркивает представительность начальных участков, описываемых уравнением Тейса — Джейкоба. По начальной ординате и угловому коэффициенту комбинированного графика получены следующие параметры:

$km = 94$ м²/сутки, $a = 3 \cdot 10^5$ м²/сутки. Сравним параметры, полученные тремя способами обработки (табл. 16).

Таблица 16

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| Временной . . . . . | 97 | $4{,}1 \cdot 10^5$ |
| Площадной . . . . . | 97 | $3{,}8 \cdot 10^5$ |
| Комбинированный . . . | 94 | $3{,}0 \cdot 10^5$ |

Как видно из табл. 16, результаты всех трех способов совпадают, что свидетельствует о том, что использованные для расчетов начальные участки описываются уравнением Тейса — Джейкоба, следовательно, они представительны для обработки этим методом. Рассчитанные параметры относятся к опробованной наиболее проницаемой части слоистой толщи.

Для учета притока из верхней слабопроницаемой части разреза необходимо знать водоотдачу этой части. Все параметры, необходимые для такого расчета, могут быть определены достаточно простым приближенным методом В. А. Мироненко и Л. И. Сердюкова [82, 84]. Для этого необходимо иметь несколько наблюдательных скважин в опробуемой части разреза при условии, чтобы влияние перетока было проявлено достаточно определенно. Этот метод основан на следующей зависимости, полученной с использованием метода интегральных соотношений:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln\frac{l(t)}{r} + \frac{l(t)}{r} - 1\right], \tag{7.3}$$

где $km$ — водопроводимость нижнего горизонта;

$S$ — понижение уровня в наблюдательной скважине, расположенной на расстоянии $r$ от центральной;

$l(t)$ — условный радиус влияния на момент времени $t$ от начала откачки.

Величина $l(t)$ связана с параметрами основного и питающего горизонтов следующей формулой

$$l^2(t) = 12\frac{km}{\mu_0}\left(t + \frac{1}{\beta}\right), \tag{7.4}$$

$$\beta = \frac{K_0}{\mu_0 h_0}, \tag{7.5}$$

где $\mu_0$ — водоотдача верхнего слоя;

$K_0$ и $h_0$ — коэффициент фильтрации и мощность верхнего водоносного горизонта.

Формула (7.3) справедлива при условии

$$\beta t \geqslant \frac{5\mu^*}{\mu_0}, \tag{7.6}$$

где $\mu^*$ — упругая водоотдача нижнего горизонта.

В реальных условиях это соотношение обычно выполняется через несколько суток после начала откачки.

Определение параметров производится в следующей последовательности.

1. По начальному участку временны́х графиков или по площадным графикам (формула Дюпюи для двух наблюдательных скважин) определяется величина водопроводимости нижнего водоносного горизонта ($km$). Как уже указывалось, определение $km$ по площадным графикам (или по формуле Дюпюи) возможно и при ложностационарном режиме.

2. При известных значениях $Q$, $S$ и $km$ по формуле (7.3) определяется величина $l(t)$ на несколько моментов времени. Определение проводится несложным подбором, для облегчения которого строится график зависимости $\frac{l(t)}{r} = f\left(\frac{2\pi kmS}{Q}\right)$. Если $\frac{2\pi kmS}{Q} > 3{,}5$, величина $l(t)$ может быть рассчитана по формуле

$$l(t) = r \cdot e^{\left(\frac{2\pi kmS}{Q}+1\right)}. \tag{7.7}$$

3. Производится уточнение величины водопроводимости нижнего горизонта по формуле

$$km = \frac{Q}{2\pi (S_1 - S_2)}\left[\ln\frac{r_2}{r_1} - \frac{r_2 - r_1}{l(t)}\right]. \tag{7.8}$$

Если эта величина будет существенно отличаться от принятой при расчете $l(t)$, следует повторить расчет $l(t)$.

4. По найденным значениям $l(t)$ на два момента времени $t_2$ и $t_1$ определяется $\beta$:

$$\beta = \frac{1 - \left[\frac{l(t_1)}{l(t_2)}\right]^2}{\left[\frac{l(t_1)}{l(t_2)}\right]^2 \cdot t_2 - t_1}. \tag{7.9}$$

Формула (7.9) справедлива только при выполнении условия (7.6). Для проверки выполнимости этого условия следует провести определения $\beta$ при нескольких значениях $t_1$, взяв фиксированное постоянное значение $t_2$, и построить график $\beta = f(t)$. Этот график отвечает убывающей функции, стремящейся к действительному значению $\beta$. Численный анализ, проведенный В. А. Мироненко и Л. И. Сердюковым, показал, что выполаживание графика происходит настолько резко, что определение действительного значения $\beta$ не представляет никаких трудностей.

5. По найденному значению β параметры верхнего горизонта $\mu_0$ и $K_0$ определяются по формулам:

$$\mu_0 = \frac{12km}{l^2(t)}\left(t + \frac{1}{\beta}\right); \tag{7.10}$$

$$K_0 = \beta \cdot \mu_0 \cdot h_0. \tag{7.11}$$

Приведем пример расчета для условий рассмотренного ранее участка Даукара. Коэффициент водопроводимости, определенный по начальным участкам временных графиков и по площадному графику, оказался практически одинаковым и равным 97 м²/сутки (см. табл. 16). Определение $l(t)$ проводим по данным о понижениях уровня по скважине 31. Результаты расчета приведены в табл. 17. Расчеты $l(t)$ выполнены по формуле (7.7), так как $\frac{2\pi kmS}{Q} = \frac{6{,}28 \cdot 97 \cdot 2{,}75}{363} > 3{,}5$. Контрольные расчеты водопроводимости по формуле (7.8) показали, что его уточнения, как и уточнения величины $l(t)$, не требуется.

Таблица 17

| № п. п. | $t$, сутки | $S$, м | $r$, м | $Q$, м³/сутки | $l(t)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,67 | 2,75 | 10,0 | 363 | 2960 |
| 2 | 4,16 | 2,90 | 10,0 | 363 | 3400 |
| 3 | 16,7 | 2,92 | 10,0 | 363 | 3690 |
| 4 | 21,1 | 2,95 | 10,0 | 363 | 3840 |
| 5 | 41,6 | 3,00 | 10,0 | 363 | 4030 |

По найденным значениям $l(t)$ на два момента времени $t_1$ и $t_2$ определяем β по формуле (7.9). При этом для $t_2$ во всех расчетах приемлем последний момент времени 41,6 суток. Результаты расчета приведены ниже.

| $t_1$ | β |
|---|---|
| 1,67 | 0,0210 |
| 4,16 | 0,0110 |
| 16,7 | 0,0087 |
| 21,1 | 0,0053 |

По графику $\beta = f(t)$ действительное значение β определено равным 0,005.

Далее по формулам (7.10) и (7.11) определяем $\mu_0$ и $K_0$.

$$\mu_0 = \frac{12km}{l^2(t)}\left(t + \frac{1}{\beta}\right) = \frac{12 \cdot 97}{4030^2}\left(41{,}6 + \frac{1}{0{,}005}\right) = 1{,}7 \cdot 10^{-2};$$

$$K_0 = \beta \cdot \mu_0 \cdot h_0 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-2} \cdot 20 = 1{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ м/сутки.}$$

Имея коэффициент фильтрации, водоотдачу и среднюю мощность верхней части разреза, определим по формуле (7.2) время возможного

появления конечного логарифмического участка, несущего информацию о водоотдаче верхнего слоя:

$$t \geqslant \frac{5 \cdot 0{,}017 \cdot 20{,}0}{1{,}7 \cdot 10^{-3}} \geqslant 1000 \text{ суток.}$$

Следовательно, при данном коэффициенте фильтрации получение представительного конечного участка практически невозможно, и обрабатывать опытные данные следует изложенным способом.

Таким образом, для определения водоотдачи верхней части разреза требуется доказательство реальности перетока. С достаточным успехом это можно установить с помощью временного и комбинированного прослеживания.

Основным параметром по его роли в прогнозном расчете в условиях двухслойного разреза является коэффициент водопроводимости нижней части разреза. Он является также исходной величиной для определения водоотдачи верхнего слоя по методу В. А. Мироненко и Л. И. Сердюкова. Последними рекомендуется определять коэффициент водопроводимости по формуле Дюпюи по двум наблюдательным скважинам. Учитывая неоднородность нижней части, возможное влияние плановых граничных условий и т. д., определение коэффициента водопроводимости только по двум скважинам без соответствующего контроля недостоверно. Поэтому в случаях, когда опытные закономерности представлены первым и вторым участками, коэффициент водопроводимости необходимо определять методом Джейкоба по крайней мере двумя способами. Как показал анализ конкретного примера, удобно пользоваться способами площадного и комбинированного прослеживания. Имея достоверные значения коэффициента водопроводимости, стабильные по способам обработки, определение водоотдачи верхнего слоя можно производить методом В. А. Мироненко.

Представление об относительной достоверности этого метода можно получить, сравнив величины пьезопроводности нижнего слоя, полученные в описанном опыте, с результатами, определенными методом Джейкоба (табл. 18). Последним методом, как это следует из совпадения величин, найденных тремя способами обработки, получены вполне надежные значения.

Таблица 18

| № скважин | Значения $a$, м²/сутки | |
|---|---|---|
| | по В. А. Мироненко | по Джейкобу |
| 25 | $3 \cdot 10^5$ | $3{,}7 \cdot 10^5$ |
| 31 | $1{,}5 \cdot 10^5$ | $5{,}5 \cdot 10^5$ |
| 41 | $1{,}4 \cdot 10^5$ | $4.1 \cdot 10^5$ |

Как видно из табл. 18, получены расхождения до трех-четырехкратного занижения по методу В. А. Мироненко и Л. И. Сердюкова. Такие расхождения имеют существенные последствия только в расчетах по схеме замкнутого пласта. Следовательно, принятая схематизация отражает реальные условия, а прогнозный расчет с использованием водоотдачи верхнего слоя, определенной методом В. А. Мироненко и Л. И. Сердюкова, допустим.

Таким образом, при производстве опытных работ в двухслойных толщах в зависимости от соотношения водоотдачи, коэффициентов фильтрации слоев и продолжительности возмущения опытная закономерность может быть представлена:

а) начальным прямолинейным полулогарифмическим участком, заключающим информацию о фильтрационных и емкостных свойствах опробуемого слоя;

б) начальным участком и участком ложной стабилизации, свидетельствующим о наличии перетока;

в) полной формой, заключающей информацию о фильтрационных свойствах опробуемого слоя и суммарной емкостной характеристике всей толщи. В дальних наблюдательных скважинах начальные участки могут отсутствовать.

Возможность появления одного из этих случаев в реальных условиях является фактором непрогнозируемым, поэтому интерпретацию опытных данных необходимо производить исходя из конкретной формы полученных временных или комбинированных графиков прослеживания. Основное содержание интерпретации заключается тогда в поиске и квалификации представительных участков.

1. Если опытные закономерности представлены простыми прямолинейными полулогарифмическими временными (или комбинированными) графиками, обработку производят методом Джейкоба. По начальным ординатам и угловым коэффициентам определяется коэффициент водопроводимости и пьезопроводности опробуемого слоя. В этом случае справедливы критерии и рекомендации относительно учета сложного характера возмущения и влияния границ пласта в плане.

2. Если опытные закономерности заключают участок ложностационарного режима, то параметры опробуемого слоя определяются методом Джейкоба, а водоотдача верхнего слоя — методом В. А. Мироненко, Л. И. Сердюкова. В этом случае, как и в предыдущем, применимы критерии и приемы, учитывающие сложный характер возмущения и влияние плановых границ пласта.

3. Если опытные закономерности заключают конечный квазистационарный участок, то методом Джейкоба определяется коэффициент водопроводимости опробуемого слоя и коэффициент уровнепроводности с учетом гравитационной водоотдачи верхнего слоя. При существенной продолжительности периода ложной стабилизации критерии, учитывающие влияние границ пласта в плане, не применимы.

### Многослойная толща с относительно выдержанными разделяющими слоями

При наличии водоупоров мощностью несколько десятков метров с коэффициентами фильтрации $K_0 < 10^{-4}$ м/сутки эффект взаимодействия ощутимо проявляется через длительный промежуток времени, как правило, более 10 суток.

Следовательно, используя опытные закономерности в начальном диапазоне времени, мы с достаточной для практики точностью можем определять основные параметры водоносного слоя методом Джейкоба для изолированного напорного пласта. Основным вопросом интерпретации опытных данных при этом является диагностирование начального участка для установления факта отсутствия в этот период нежелательного влияния перетока. Эта задача с успехом решается способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания. Основной контролирующий признак достоверности параметров — стабильность по способам обработки. В данном случае применимы приемы, рекомендованные для сложного характера возмущения, и критерии — для пластов, ограниченных в плане.

Однако, как уже нами указывалось, в некоторых случаях в многослойных толщах целесообразна постановка специальных опытных работ, длительность которых должна составлять 30—40 суток. По результатам таких откачек должен быть установлен сам факт перетекания через разделяющие слабопроницаемые отложения и определены гидрогеологические параметры, причем, кроме основных параметров (водопроводимости и пьезопроводности), должен быть также рассчитан коэффициент перетекания.

Как это было показано в главе 1, в общем случае на графиках $S$ — lg $t$ в условиях многослойной толщи выделяется три периода. Первый период, при котором перетекание не сказывается, при коэффициентах фильтрации разделяющих слоев $10^{-2}$—$10^{-3}$ м/сутки может иметь небольшую протяженность (особенно для дальних наблюдательных скважин). Поэтому в таких условиях на графиках выделяется либо второй, либо второй и третий периоды. При этом в зависимости от условий в пласте, из которого происходит перетекание, третий период может быть различным. Если в этом пласте напор не изменяется, наступает стабилизация уровня в опробуемом горизонте, при изменении напора — уровень снижается.

В последнем случае темп падения уровня на третьем участке графика $S$ — lg $t$ отвечает условиям изолированного напорного пласта с параметрами, определяемыми по следующим зависимостям:

$$km = (km)_1 + (km)_2, \tag{7.12}$$

$$a = \left[\frac{(km)_1 + (km)_2}{\mu_1^* + \mu_2^*}\right] \cdot e^{\alpha W}, \tag{7.13}$$

где $(km)_1$ и $(km)_2$ — соответственно водопроводимости горизонта, из которого происходит перетекание, и опробуемого горизонта;

$\mu_1^*$ и $\mu_2^*$ — коэффициенты упругой водоотдачи этих горизонтов (если горизонт, из которого происходит перетекание, безнапорный, вместо упругой водоотдачи используется гравитационная);

$\alpha = \frac{(km)_1}{(km)_2}$;

$W$ — предельное значение функции Хантуша при перетекании с постоянным уровнем, зависящая от величины $\frac{r}{B}$. Функция $W\left(\alpha, \frac{r}{B}\right)$ табулирована во многих источниках [например, [29, 125]].

Так как при наличии только второго периода внешний вид графиков $S$ — lg $t$ в пластах с перетеканием будет аналогичен графикам в изолированных пластах, необходимо провести проверочные расчеты, доказывающие наличие перетекания. Такая проверка проводится путем сопоставления расчетов коэффициента водопроводимости по площадным графикам (формула Дюпюи) и временным графикам.

Так как в процессе откачки важно установить, происходит ли снижение уровня в питающем пласте, необходимо наблюдательные скважины оборудовать на оба водоносных горизонта.

При обработке данных опытных откачек в условиях многослойных толщ могут быть следующие случаи.

1. Наблюдательные скважины в смежных водоносных горизонтах не реагируют. На графике $S$ — lg $t$ выделяется один прямолинейный участок. Коэффициент водопроводимости, определенный по этому графику, близок к коэффициенту водопроводимости, рассчитанному по графику $S$ — lg $r$ (или формуле Дюпюи). Это свидетельствует о том, что перетекание практически не происходит.

2. Наблюдательные скважины в смежных водоносных горизонтах практически не реагируют. В процессе откачки зафиксирована стабилизация уровня в наблюдательных скважинах, заложенных на основной водоносный горизонт. Коэффициент водопроводимости, определенный по графику $S$ — lg $t$ по участку, предшествующему стабилизации, значительно превышает коэффициент водопроводимости, рассчитанный по площадному графику (формуле Дюпюи). Такое сочетание различных признаков говорит о перетекании с постоянным уровнем в питающем пласте ($H = const$; $S = 0$).

В этом случае для расчета водопроводимости следует использовать графики $S$ — lg $r$ на период стабилизации и по этому же графику определять коэффициент перетекания. Методика его определения будет изложена ниже.

3. Наблюдательные скважины в смежных водоносных горизонтах не реагируют. В скважинах на основной водоносный горизонт происходит снижение уровня. На графике $S$ — lg $t$ выделяются два прямолинейных участка. Коэффициенты водопроводимости, рассчитанные по первому прямолинейному участку графика $S$ — lg $t$ и по гра-

фикам $S$ — lg $r$, практически совпадают. Коэффициент водопроводимости, определенный по второму участку графика, значительно превышает его значения, полученные по первому участку и площадным графикам. В таких случаях можно сделать вывод о наличии перетекания. Расчетные параметры определяются следующим образом. Коэффициент водопроводимости и пьезопроводности — по первому прямолинейному участку графика $S$ — lg $t$ с контрольной проверкой коэффициента водопроводимости по графику $S$ — lg $r$, а коэффициент перетекания — по данным о понижении уровня на конец откачки при известном значении пьезопроводности и водопроводимости.

Для определения коэффициента перетекания в этих случаях используется формула

$$S = \frac{Q}{4\pi km} W\left(\alpha \cdot \frac{r}{B}\right), \tag{7.14}$$

$$\alpha = \frac{r^2}{4at}, \tag{7.15}$$

где $W$ — функция Хантуша.

По известным значениям $Q$, $S$ и $km$ сначала определяется $W$. По величине $W$ при известном значении $\alpha$ находится отношение $\frac{r}{B}$, а затем и величина коэффициента перетекания $B$.

4. В наблюдательных скважинах, оборудованных на смежные горизонты, происходит снижение уровня, не стабилизирующееся до конца откачки. На графике $S$ — lg $t$ выделяется два или три прямолинейных участка, причем коэффициент водопроводимости, определенный по второму (при наличии трех) или по первому (при наличии двух) участку графика, значительно превышает коэффициент водопроводимости, рассчитанный по графику $S$ — lg $r$. В этих условиях можно считать, что происходит перетекание с изменяющимся уровнем в питающем горизонте, и оценку эксплуатационных запасов подземных вод проводить так же, как и для изолированных пластов, но с параметрами, определенными по последнему участку графика $S$ — lg $t$.

5. В наблюдательных скважинах, оборудованных на смежные водоносные горизонты, происходит снижение уровня, однако через некоторое время режим стабилизируется. Такая же закономерность изменения уровня характерна для нижнего водоносного горизонта, причем вид графика $S$ — lg $t$ аналогичен графику при перетекании с постоянным уровнем в питающем пласте. Такие условия характерны обычно для многослойных толщ, когда верхний водоносный горизонт, из которого происходит питание, гидравлически связан с поверхностным водотоком или водоемом. Фильтрация поверхностных вод приводит к стабилизации движения в верхнем водоносном горизонте, что в свою очередь предопределяет наступление стационарного режима в опробуемом пласте. Для расчета эксплуатационных запасов в рассматриваемых условиях необходимо определить коэффициент водопроводимости нижнего горизонта и коэффициент перетекания. Определение коэффициента водопроводимости следует проводить по первым прямолинейным участкам временных графиков и графику $S$ — lg $r$.

Последний график может быть использован и для определения коэффициента перетекания, но в этом случае понижения уровня должны быть взяты на момент стабилизации режима в нижнем горизонте. Строго говоря, определенный таким методом коэффициент перетекания не будет точно соответствовать его теоретическому значению. При определении этого коэффициента, по данным установившегося понижения в одной точке, его значения будут зависеть от местоположения наблюдательной скважины, а при построении графика $S$ — lg $r$ будет наблюдаться разброс точек. Это связано с тем, что использование для определения коэффициента перетекания зависимостей для перетекания с постоянным уровнем в питающем пласте не совсем верно, так как постоянство уровня наблюдается не с самого начала откачек. Однако, как показали наши исследования, выполненные на аналоговой машине УСМ-1, использование коэффициента перетекания, определенного указанным методом, дает вполне достаточную для практических целей точность при оценке эксплуатационных запасов.

Рассмотрим методику обработки данных откачки в условиях трехслойной толщи, когда подземные воды верхнего горизонта гидравлически связаны с поверхностными водами, на примере групповой опытной откачки из нижнечетвертичного водоносного гориэонта участка Луговое Сусунайской депрессии на острове Сахалин (по данным А. Ф. Прядко, Б. А. Гришечкина, В. М. Нильги). На участке выделяется два основных водоносных горизонта (верхне-среднечетвертичный и нижнечетвертичный), приуроченных к песчано-гравийно-галечниковым отложениям с линзовидными включениями глин и алевритов. Водоносные горизонты разделены относительно выдержанной пачкой глин мощностью от 10 до 20 м, местами, особенно в прибортовых частях депрессии, глины замещаются песками или алевритами.

При разведке нижнечетвертичного горизонта из него была проведена откачка из 5 скважин с суммарным дебитом 32 780 м³/сутки. Наблюдения за изменением уровня проводились по большому количеству скважин, оборудованных как на верхний, так и на нижний водоносные горизонты. Геологический разрез по участку работ и схема расположения скважин показаны на рис. 46. На рис. 47 приведены графики $S$ — lg $t$ для скв. 42 (верхний горизонт), скв. 47 (нижний горизонт) и график $S$ — lg $r$ для наблюдательных скважин, оборудованных на нижний водоносный горизонт.

Как видно из графиков $S$ — lg $t$, в обоих горизонтах примерно через 300 ч после начала откачки наблюдается стабилизация уровня. Коэффициент водопроводимости, определенный по первому прямолинейному участку графика (участок I), оказался равным 1370 м²/сутки. На графике $S$ — lg $r$ отмечается некоторый разброс точек, тем не менее осредняющая прямая может быть проведена достаточно четко. Величина коэффициента водопроводимости, определенная по этому графику, составила 1500 м²/сутки, т. е. очень близка к значению, рассчитанному по временно́му графику.

Определение величины $B$ производится с использованием зависимости (7.16) для условий перетекания с постоянным уровнем в питающем пласте:

$$S = \frac{0{,}366Q}{km} \lg \frac{1{,}12B}{r}. \qquad (7.16)$$

При наличии нескольких наблюдательных скважин определение $B$ проводится по графику $S - \lg r$. С этой целью по графику по

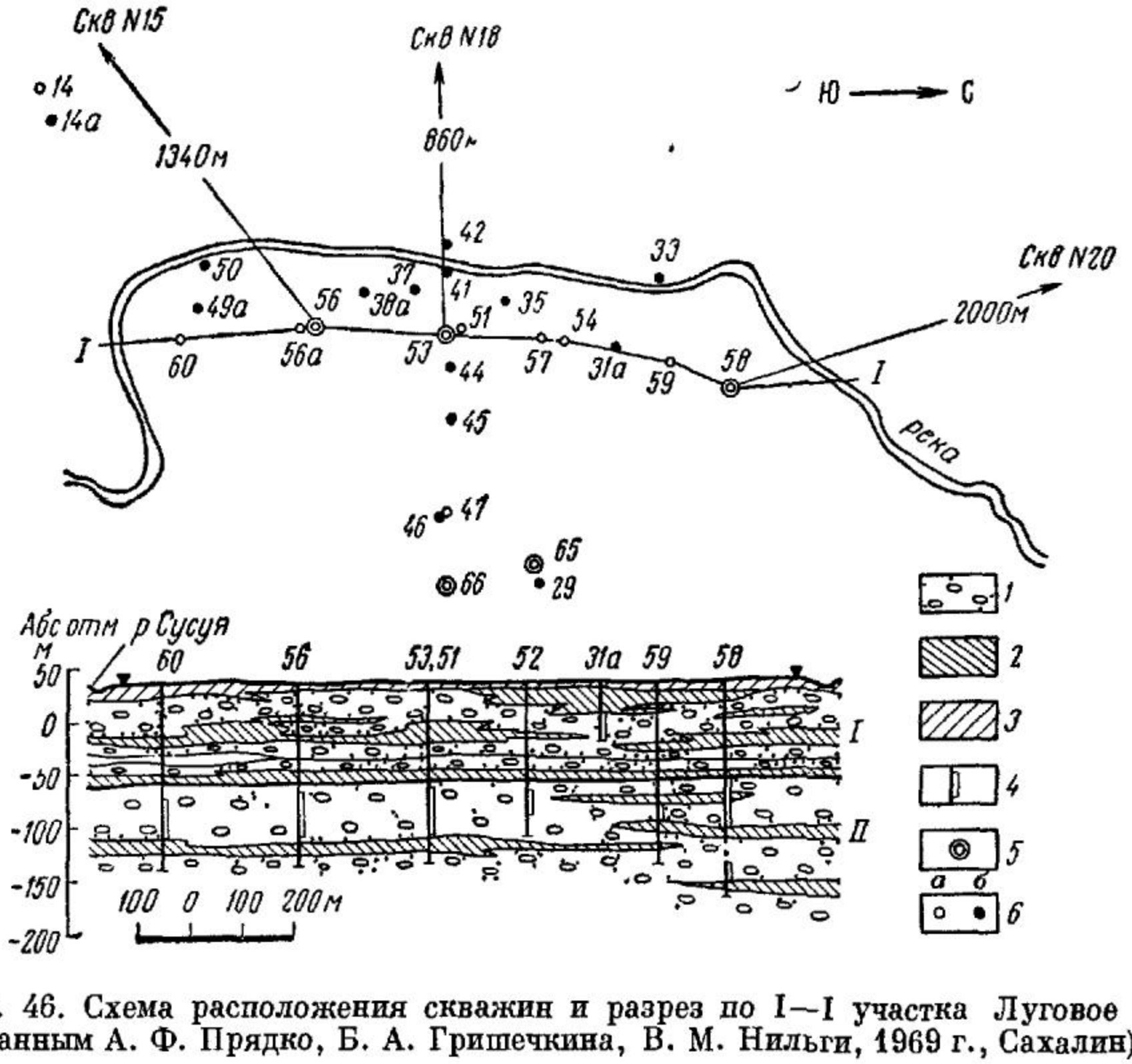



Рис. 46. Схема расположения скважин и разрез по I—I участка Луговое (по данным А. Ф. Прядко, Б. А. Гришечкина, В. М. Нильги, 1969 г., Сахалин)

*1* — гравийно-галечные отложения, *2* — глины, *3* — суглинки, *4* — положение фильтра, *5* — опытные скважины, *6* — наблюдательные скважины *а* — на нижний горизонт, *б* — на верхний горизонт I — верхний горизонт, II — нижний горизонт

отрезку, отсекаемому на оси $\lg r$, находится значение $\lg R$, численно равное $\lg 1{,}12B$ (здесь $R$ — приведенный радиус влияния). $B$ рассчитывается по формуле

$$B = 0{,}89R. \qquad (7.17)$$

Величина $B$, определенная по графику $S \div \lg r_{пр}$, в рассматриваемом примере оказалась равной 4700 м.

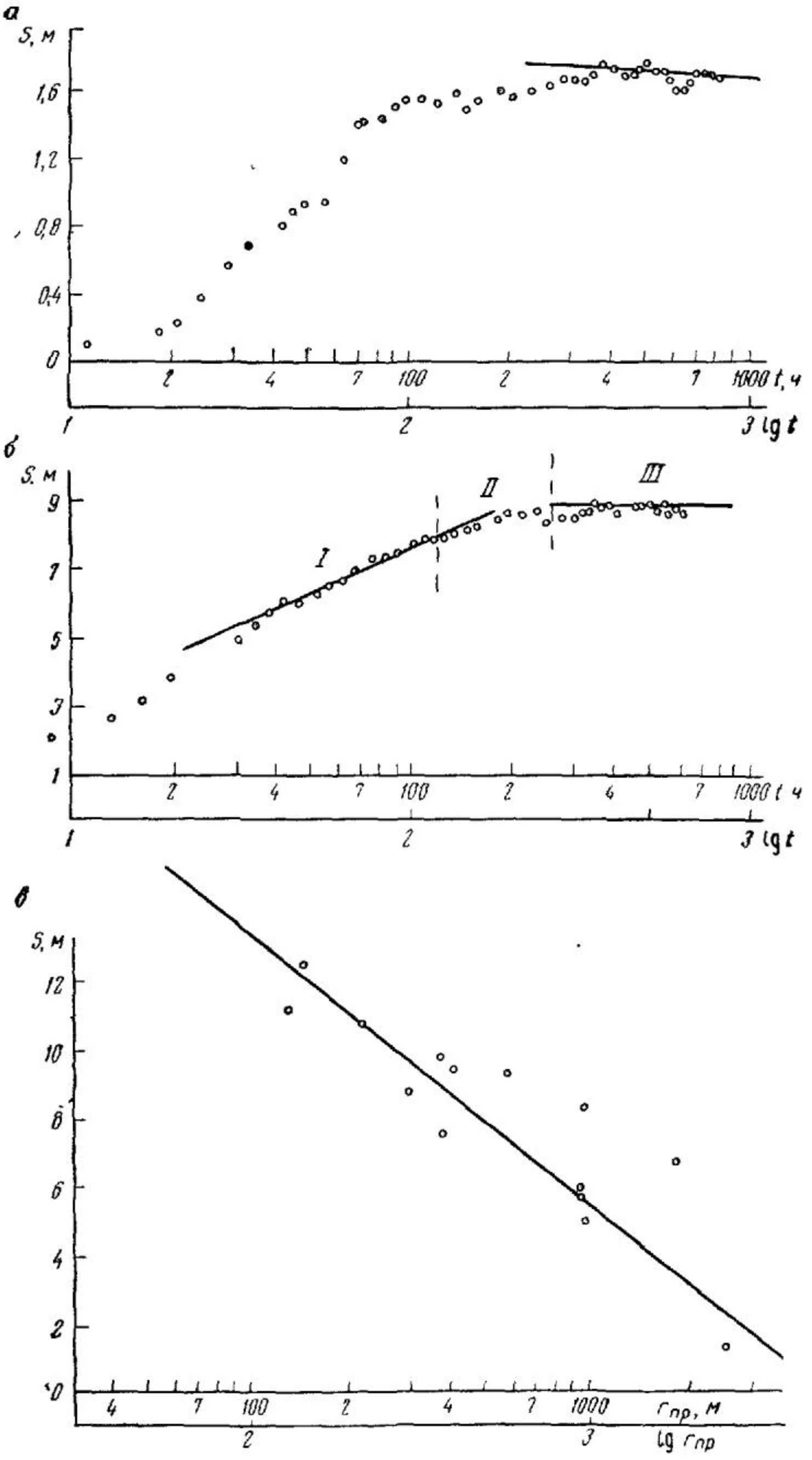



Рис. 47. Графики временного и площадного прослеживания понижения при опробовании *слоистой толщи групповой откачкой* на кусте 53, 56, 58, 65, 66 с $\sum Q =$ $= 32\,780$ м³/сутки:

*а* — график временного прослеживания по скв. 42 на верхний горизонт, $r_{пр} = 404$ м; *б* — *график временного прослеживания* по скв. 47 на нижний горизонт, $r_{пр} = 304$ м, $km =$ $= 1370$ м²/сутки; *в* — график площадного прослеживания по нижнему горизонту, $R_{пр} =$ $= 5250$ м, $km = 1500$ м²/сутки, $B = 4700$ м

**Многослойные толщи с чередованием относительно маломощных водоносных и слабопроницаемых прослоев**

Подобный тип разреза встречается в разведочной практике довольно часто на периферии конусов выноса, в аллювии. Разделяющие прослои в таких разрезах представлены, как правило, супесчаными и суглинистыми грунтами и имеют небольшую мощность. Взаимодействие между проницаемыми прослоями происходит через несколько часов, в первые сутки. Для данного типа разреза характерна сложная невыдержанная морфология разделяющих прослоев. Отмечается резкая изменчивость их мощности до полного выклинивания.

В условиях такого разреза, несмотря на то что эффект взаимодействия практически достижим, возможность применения строгих решений для определения расчетных параметров кажется сомнительной, поскольку реальные условия существенно отличаются от принятых при выводе этих решений. Это относится к условию постоянства мощности. В реальных условиях она оказывается переменной. Известно, что изменение мощности является фактором аномальности [126]. Сложным становится и механизм перетока из-за переменной мощности разделяющих слоев и наличия окон в них.

Таким образом, определение расчетных параметров методом эталонных кривых или методом Хантуша будет весьма условным. Если учесть то, что сложность разреза сочетается со сложностью плановых граничных условий, то и определение расчетных параметров и прогнозный расчет с учетом перетока становятся крайне неопределенными. Отсюда понятно стремление к упрощенным расчетным схемам или игнорированию перетока. Основные расчетные параметры определяются методом Джейкоба для изолированных напорных пластов по начальным участкам опытных закономерностей изменения уровня. В этих условиях, когда эффект взаимодействия слоев проявляется очень быстро, задача диагностирования представительных участков становится главным содержанием интерпретации.

Особенности обработки опытных данных в сложнослоистых толщах можно рассмотреть на примере Андижанского месторождения подземных вод, приуроченного к конусу выноса. На рис. 48 показан разрез и схема опробования конуса. Опробование производилось несколькими кустами с двумя наблюдательными скважинами в каждом. Опробовались различные прослои слоистой толщи (показано стрелками) раздельно и изолированно. Вся слоистая толща имеет общую пьезометрическую поверхность. Разделяющие прослои, представленные суглинками, обычно сложной морфологии.

На рис. 49 показаны графики комбинированного прослеживания по кусту 36 с наблюдательными скважинами 5 — в 25 м и 6 — в 104 м от возмущающей. Как видно, графики обеих скважин имеют общую касательную, но график дальней скважины представлен на ней настолько малым числом точек, что интерпретация каждого графика в отдельности была бы крайне неопределенной. Действительно, временные графики (рис. 50) положительно аномальны и однотипны

по форме. В обеих скважинах через два часа наступает стабилизация уровня. Получены следующие параметры по начальным участкам графиков (табл. 19).

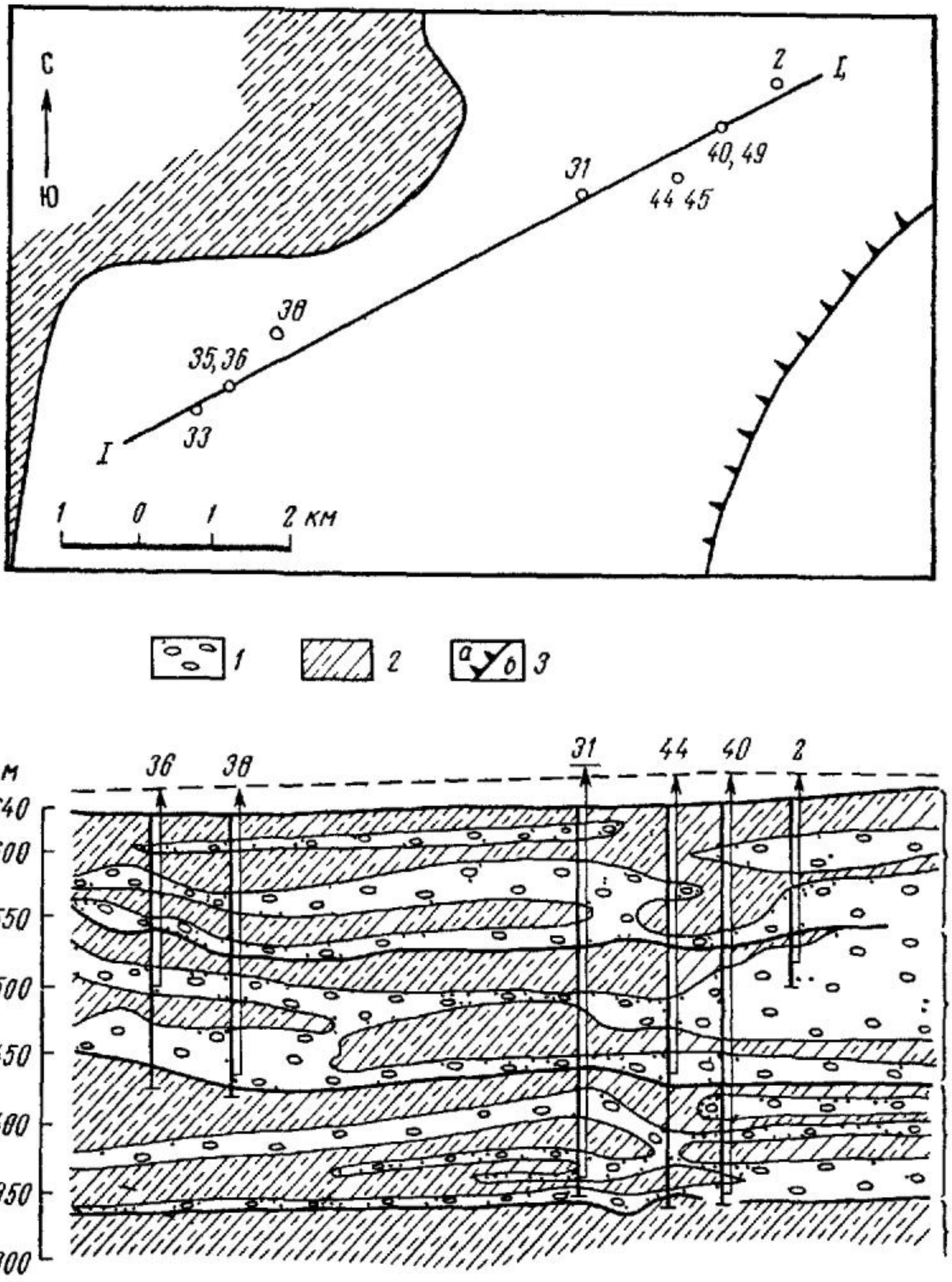



Рис. 48. Гидрогеологическая схема и разрез по I—I слоистой толщи на опытном участке, куст 36 (по данным К. Р. Рахматова, 1967 г., Средняя Азия)

*1* — галечники, *2* — суглинки, *3* — граница зон *а* — напорной и *б* — переходной к безнапорной

При сравнении данных таблицы следует, что параметры по дальней скважине существенно отличны. Временной график по скв. 6 аномален практически во всем диапазоне времени. Интерпретация комбинированных графиков более определенна. По ним вычислены

Таблица 19

| № скважины | $r$, м | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|
| 36 | 0,1 | 475 | — |
| 5 | 25 | 450 | $8{,}1 \cdot 10^6$ |
| 6 | 104 | 900 | $9 \cdot 10^7$ |

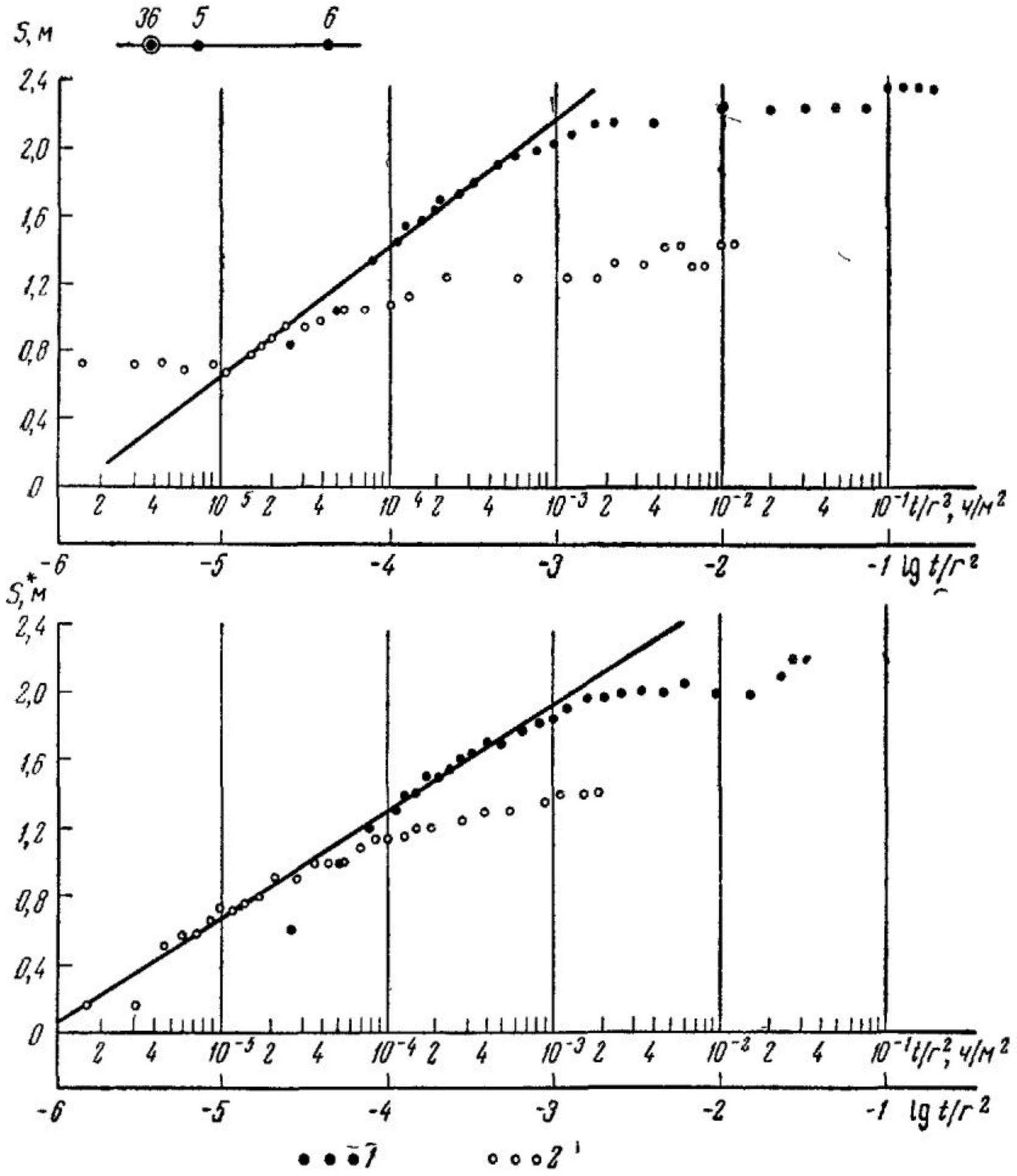



Рис. 49. Графики комбинированного прослеживания по кусту 36.

*а* — понижения уровня, $km$ = 499 м²/сутки, $a$ = $7{,}9 \cdot 10^6$ м²/сутки; *б* — восстановления уровня, $km$ = 534 м²/сутки, $a$ = $1{,}1 \cdot 10^7$ м²/сутки. Расстояние $r$ наблюдательных скважин. *1* — 25 м, *2* — 104 м

$km = 499$ м²/сутки, $a = 7{,}9 \cdot 10^6$ м²/сутки. Коэффициент водопроводимости рассчитан также по формуле Дюпюи при $t = 30$ ч, что соответствует периоду стабилизации. Сравним параметры по способам обработки (табл. 20).

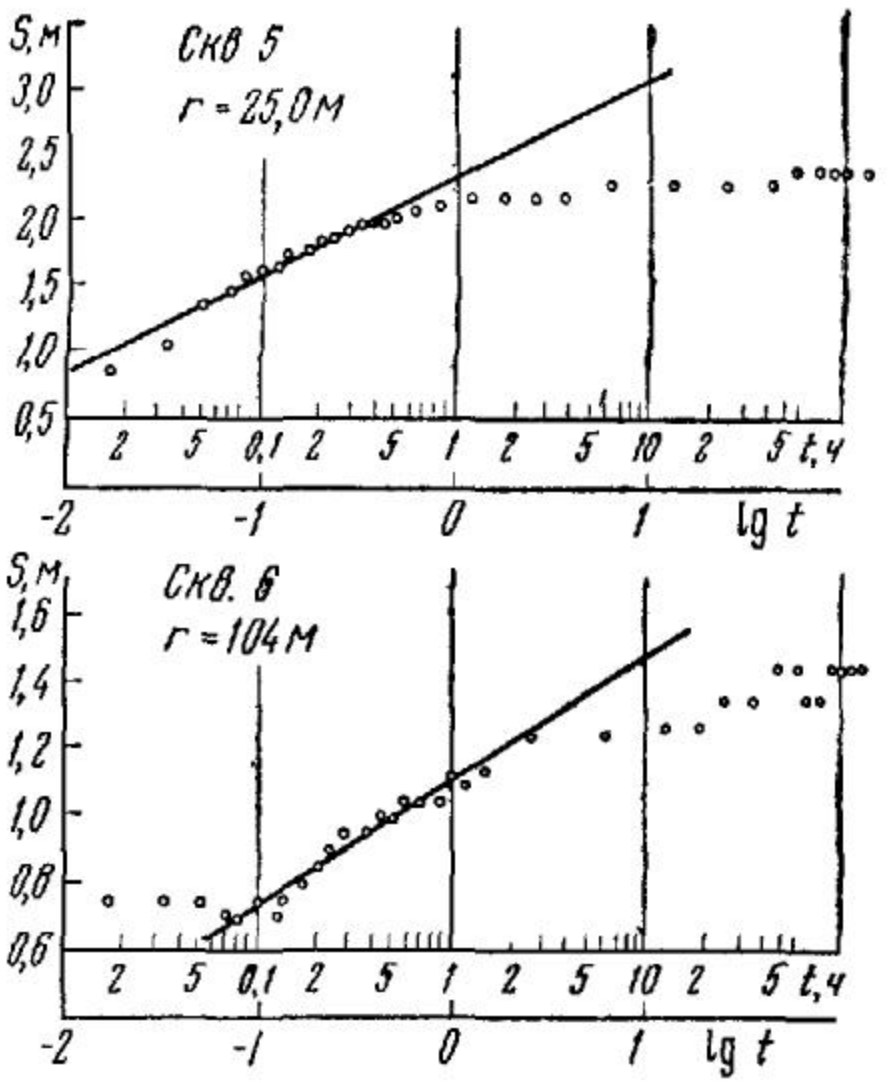



Рис. 50. Графики временного прослеживания понижения по кусту 36

| № наблюдательной скважины | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km = \frac{0{,}183Q}{C}$ | $A$ | lg $a$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 1866 | 0,76 | 450 | 2,34 | 5,526 | $8{,}1 \cdot 10^6$ |
| 6 | 1866 | 0,38 | 900 | 1,10 | 6,574 | $9{,}0 \cdot 10^7$ |

Сравнение обнаруживает практическую сходность величин, что позволяет квалифицировать их как действительные параметры. Однако совершенно очевидно, что при большем удалении наблюдательных скважин получение действительных параметров и по временным, и по комбинированным графикам оказалось бы невозможным.

Таблица 20

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| $S - \lg t$ | 450 | $8{,}1 \cdot 10^6$ |
| По формуле Дюпюи | 458 | — |
| $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | 449 | $7{,}9 \cdot 10^6$ |

Кустом 49, в отличие от предыдущего, опробован другой, самый нижний (рис. 48) водоносный прослой. Сравнение параметров по способам обработки обнаруживает их практическую сходимость (табл. 21).

Таблица 21

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| $S - \lg t$ | 2080 | $3{,}2 \cdot 10^6$ |
| $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | 2080 | $4{,}6 \cdot 10^6$ |
| По формуле Дюпюи | 2000 | — |

Параметры куста 49 квалифицируются как действительные, хотя на графиках прослеживания отмечается четкая положительная аномалия. Несмотря на это, интерпретация всех видов графиков вполне однозначна.

Как показывают приведенные примеры, раздельное опробование слоев в сложнослоистых толщах позволяет сделать следующие выводы.

1. При наличии суглинистых разделяющих слоев переменной мощности (в примерах $m_0 = 0 \div 50$ м) эффект взаимодействия слоев проявляется весьма быстро, так что через 1—10 ч от начала возмущения отмечается стабилизация уровня.

2. Возможность интерпретации опытных данных методом Джейкоба существенно зависит от удаленности наблюдательных скважин от возмущающей. Необходимое расстояние наблюдательных скважин от возмущающей, позволяющее получить представительные начальные участки, определяется в основном фактором перетока и является поэтому величиной практически нерегулируемой. Следовательно, реальная сложность обработки не может быть полностью устранена целенаправленной постановкой опыта.

3. Использование строгих решений для обработки опытных данных в сложнослоистых толщах представляется сомнительным из-за сложности механизма перетока.

Отмеченные особенности позволяют заключить, что раздельное опробование сложнослоистых толщ с точки зрения возможных трудностей интерпретации во многих случаях является нежелательным, но в каждом отдельном случае намечаемая схема опробования должна соответствовать предполагаемому методу подсчета запасов.

## 2. Суммарное опробование слоистых толщ

При раздельном опробовании отдельных слоев в сложнослоистых разрезах, как было показано в предыдущем разделе, имеются объективные трудности интерпретации опытных данных, даже в том случае,

если определяются лишь основные параметры: коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности. Определение основных расчетных параметров по начальным участкам временных графиков связано с ошибками в сторону завышения коэффициента водопроводимости по каждому слою за счет неучитываемого перетока.

Отмеченные обстоятельства побуждают к совершенному вскрытию сложнослоистой толщи и суммарному ее опробованию. Анализ взаимодействия нескольких слоев слоистой системы с разделяющими прослоями и без них содержится в работе [4]. Если возмущающая скважина вскрывает многослойную толщу, состоящую из слоев с параметрами $k_i$, $m_i$, $a_i$ $(i = 1, 2, \ldots, n)$, то асимптотическое выражение для понижения в возмущающей скважине и в любой точке в плане, в пределах контрольного времени, приводится к виду уравнения Тейса — Джейкоба, в котором:

$$km = \sum_{i=1}^{n} k_i m_i,$$

$$\lg a = \frac{k_1 m_1 \lg a_1 + k_2 m_2 \lg a_2 + \ldots + k_n m_n \lg a_n}{k_1 m_1 + k_2 m_2 + \ldots + k_n m_n}, \qquad (7.18)$$

т. е. коэффициент водопроводимости многослойной толщи равен сумме коэффициентов каждого слоя; логарифм коэффициента пьезопроводности равен средневзвешенному логарифму коэффициентов каждого слоя по величинам $k_i m_i$.

При отсутствии разделяющих слоев:

$$\frac{1}{a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{k_i m_i}{a_i}}{\sum_{i=1}^{n} k_i m_i}. \qquad (7.19)$$

Таким образом, если при совершенном вскрытии слоистой толщи и суммарном ее опробовании достигнута асимптотическая зависимость, описываемая уравнением Тейса — Джейкоба, то методом Джейкоба, т. е. способами временного, площадного и комбинированного прослеживания, можно определить суммарный коэффициент водопроводимости и средневзвешенную пьезопроводность.

Следовательно, при опробовании и прогнозном расчете система неразобщенных или разобщенных слоев с различными фильтрационными показателями может быть заменена однородным пластом с приведенными (суммарными и средневзвешенными) параметрами. В упомянутой работе отмечено, что опытная закономерность изменения уровня, описываемая уравнением Тейса — Джейкоба, является асимптотической, т. е. она наступает по истечении некоторого времени от начала возмущения. Характер разреза и схема куста 160/89 показаны на рис. 51. Сложнослоистая толща вскрыта практически на полную мощность возмущающей и наблюдательными скважинами. Глухими трубами перекрыто лишь около 10% верхней части

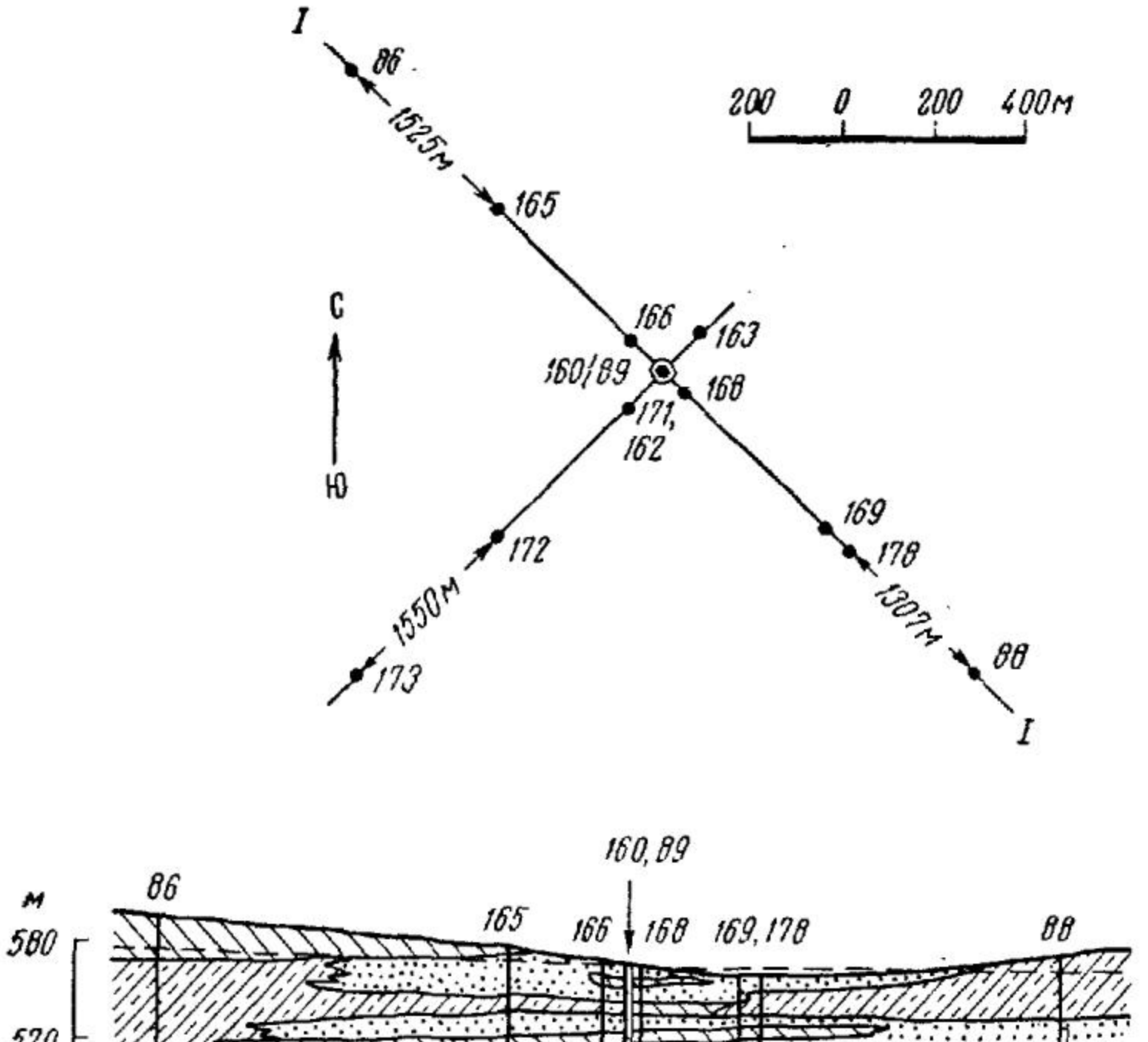



Рис. 51. Схема опробования и разрез по *I—I* сложнослоистой толщи в районе куста 160,89 (по В. А. Манукяну, 1969 г., Забайкалье)

*1* — пески; *2* — глины; *3* — суглинки

разреза. Водопроницаемые прослои представлены песками, гравием и галечниками, разделяющие прослои — глинами и суглинками. Примеры временных, площадных и комбинированных графиков представлены на рис. 52 и 53. Временные и комбинированные графики прямолинейны, площадные на разные моменты и при разных дебитах прямолинейны и параллельны. Получены следующие параметры тремя способами прослеживания (табл. 22).

Таблица 22

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| $S-\lg t$ | 3490 | $5{,}1\cdot10^6$ |
| $S-\lg r$ | 3520 | $6{,}6\cdot10^6$ |
| $S-\lg\frac{t}{r^2}$ | 3420 | $5{,}5\cdot10^6$ |

Поскольку полученные величины практически совпадают, исходя из простой формы графиков можно заключить, что данная опытная закономерность описывается уравнением Тейса — Джейкоба практически с начала возмущения. Следовательно, можно утверждать, что нормальной формой временных, комбинированных и площадных графиков является полулогарифмическая прямая. Разберем аномалии этой формы.

В тех случаях, когда имеет место несовершенное вскрытие слоистой системы, т. е. когда верхние проницаемые прослои изолированы от нижних, взаимодействие вскрытой и изолированной части разреза происходит через слабопроницаемые прослои. Возникают условия, аналогичные тем, которые имеют место в двух- или трехслойных толщах [84]. Следствием этого является положительная аномалия, т. е. выполаживание временных и комбинированных и приуменьшение ординат площадных графиков, приуроченных к поздним моментам времени. Использование конечных участков временных и комбинированных графиков будет приводить к завышению коэффициента водопроводимости. Использование площадных графиков при поздних моментах времени приводит к занижению коэффициента пьезопроводности. Основной задачей интерпретации опытной информации в таких случаях становится диагностирование представительного начального участка опытной закономерности. На рис. 54 показаны схема и разрез опытного куста 15 Урулюнгуйского месторождения. Возмущающей скважиной 15 изолировано примерно треть мощности слоистой толщи. На рис. 55 на примере отдельных наблюдательных скважин мы видим четкую положительную аномалию временных графиков через полчаса после начала возмущения. Некоторое увеличение крутизны графиков (следом за пологой его частью), создающее иллюзию эффекта Болтона, связано с колебаниями дебита откачки.

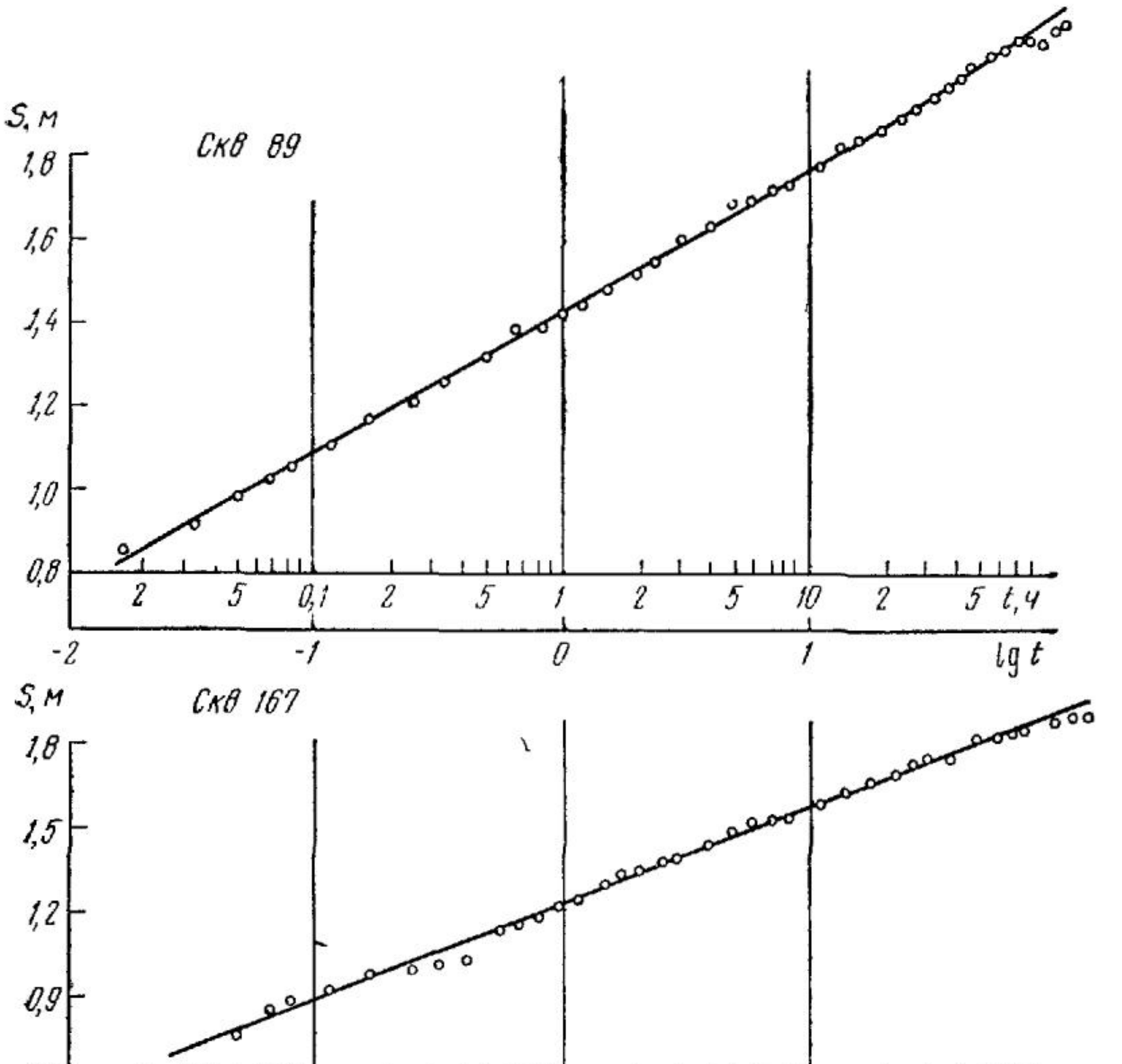



**Рис. 52. Графики временного прослеживания понижения по кусту 160.**

Скв. 89: $r = 1{,}6$ м, $km = 3470$ м²/сутки, $a = 4{,}8 \cdot 10^5$ м²/сутки, скв. 167: $r = 10$ м, $km = 3410$ м²/сутки, $a = 4{,}8 \cdot 10^6$ м²/сутки, скв. 166. $r = 92$ м, $km = 3230$ м²/сутки, $a = 5{,}5 \times 10^6$ м²/сутки

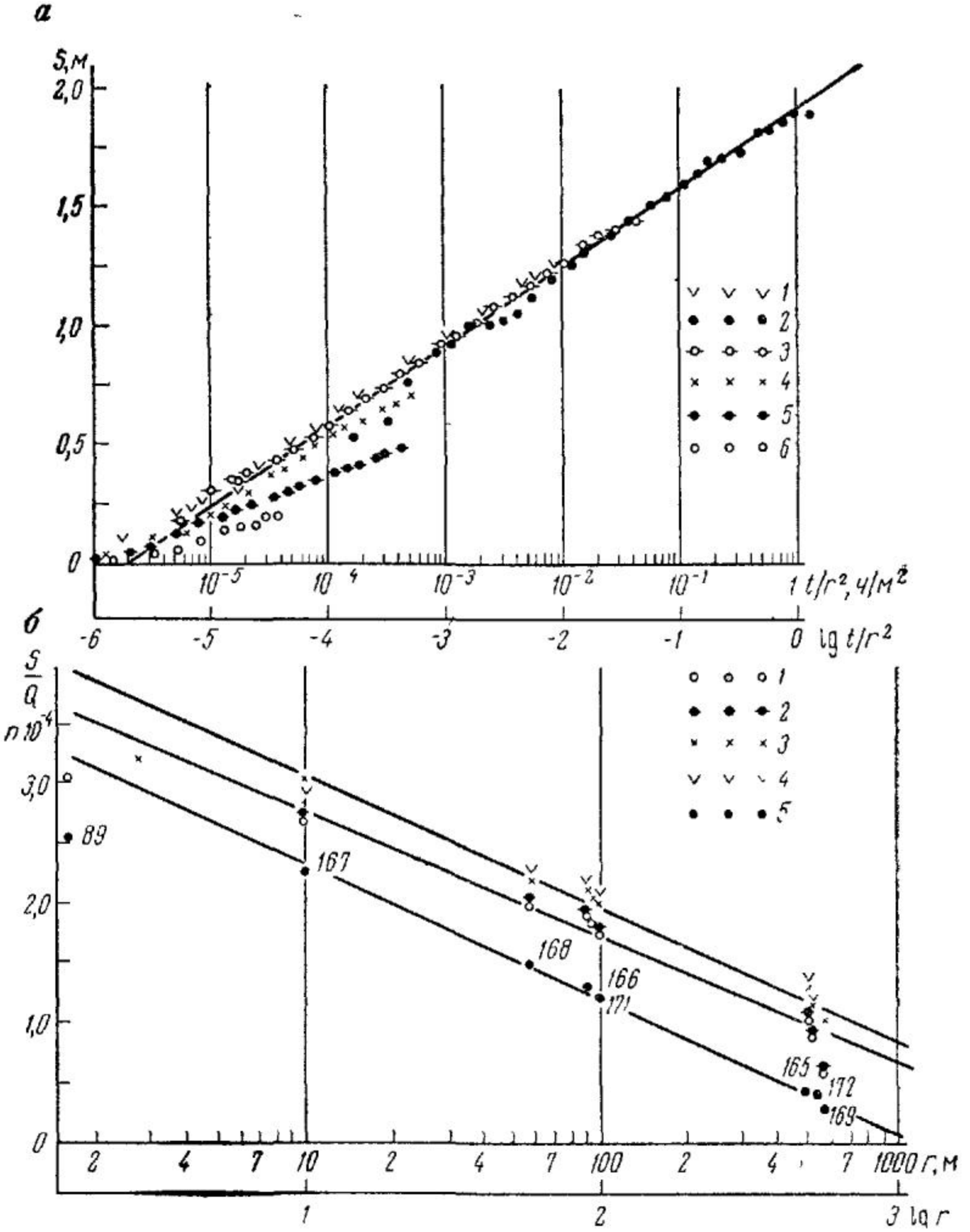



**Рис. 53. Прослеживаиие понижения при опробовании сложнослоистой толщи кустом 160,89.**

*а* — графики комбинированного прослеживания, луч III при расстоянии *r* наблюдательных скважин: *1* — 98 м, *2* — 10 м, *3* — 57 м, *4* — 497 м, *5* — 567 м, *6* — 1875 м; *б* — графики площадного прослеживания приведенного понижения при возмущающих скважинах: *1* — 160; *2* — 160,89 на момент $t_{пр}$ = 2000 мин; *3* — 160 и *4* — 160,89 на момент $t_{пр}$ = 6000 мин, *5* — скв. 160 на момент $t$ = 200 мин

| Способ обработки | № прямой | $Q$, м²/сутки | $C$ | $km$, м²/сутки | $A$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S-\lg\frac{t}{r^2}$ | 1 | 6340 | 0,34 | 3420 | 1,93 | $5{,}1\cdot10^6$ |
| $\frac{S}{Q}-\lg r$ | 1 | — | $1{,}08\cdot10^{-4}$ | 3380 | $3{,}4\cdot10^{-4}$ | $6{,}9\cdot10^6$ |
| | 2 | — | $1{,}04\cdot10^{-4}$ | 3520 | $3{,}8\cdot10^{-4}$ | $6{,}6\cdot10^6$ |
| | 3 | — | $1{,}09\cdot10^{-4}$ | 3360 | $4{,}2\cdot10^{-4}$ | $4{,}7\cdot10^6$ |

На рис. 56 на примере луча 1 появление аномалии комбинированных графиков четко связано с удаленностью наблюдательных скважин от возмущающей. Площадные графики по всем наблюдательным

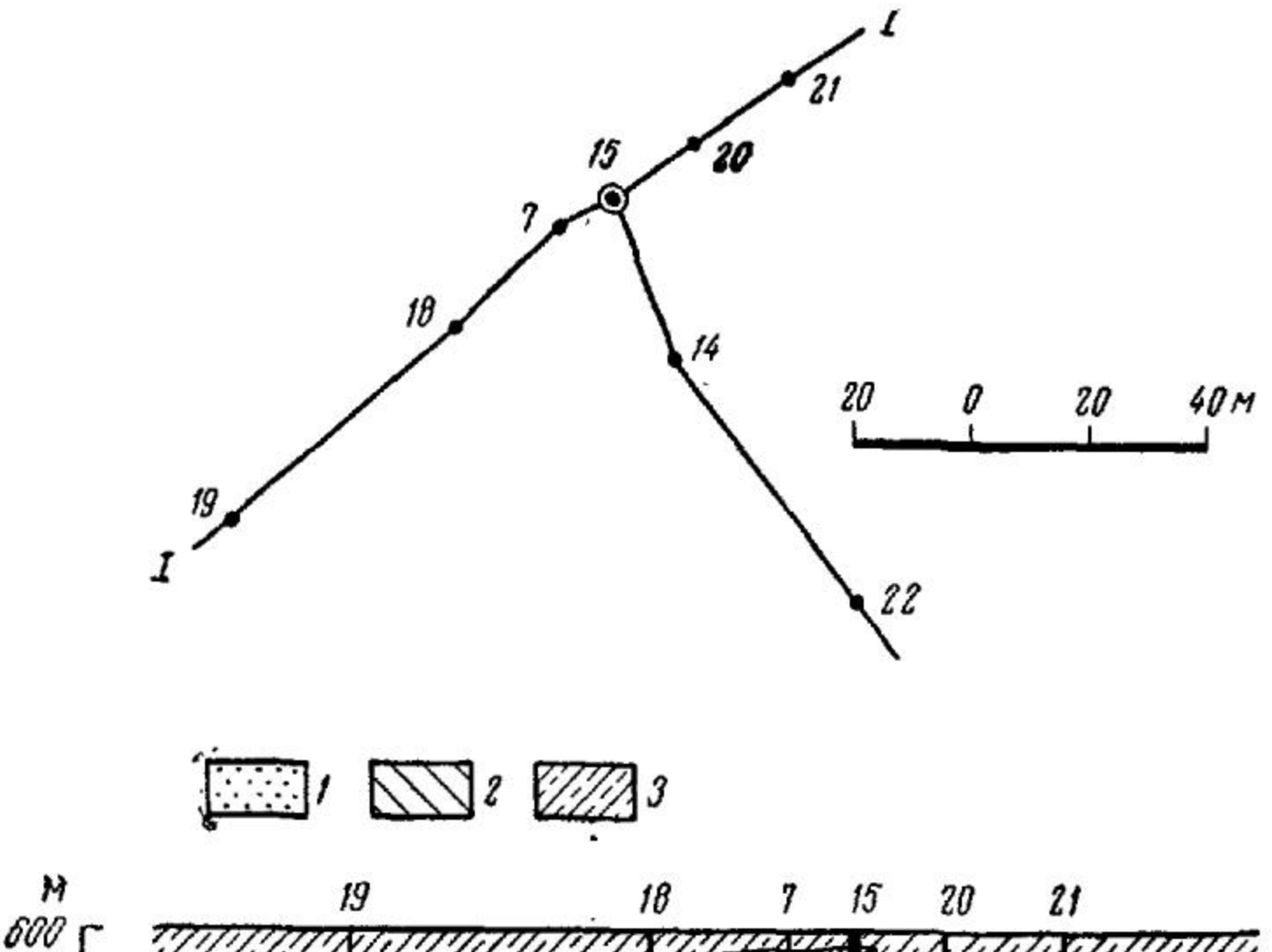



Рис. 54. Схема опытиого участка и разрез сложиослоистой толщи по *I—I* в районе опытного куста 15 (по В. А. Маиукяну, 1969 г., Забайкалье)

*1* — пески; *2* — глины; *3* — суглинки

скважинам луча прямолинейны и параллельны, но при позднем моменте времени получено заниженное значение коэффициента пьезопроводности. Несмотря на незначительную протяженность начального участка, интерпретация его однозначна. По всем трем способам

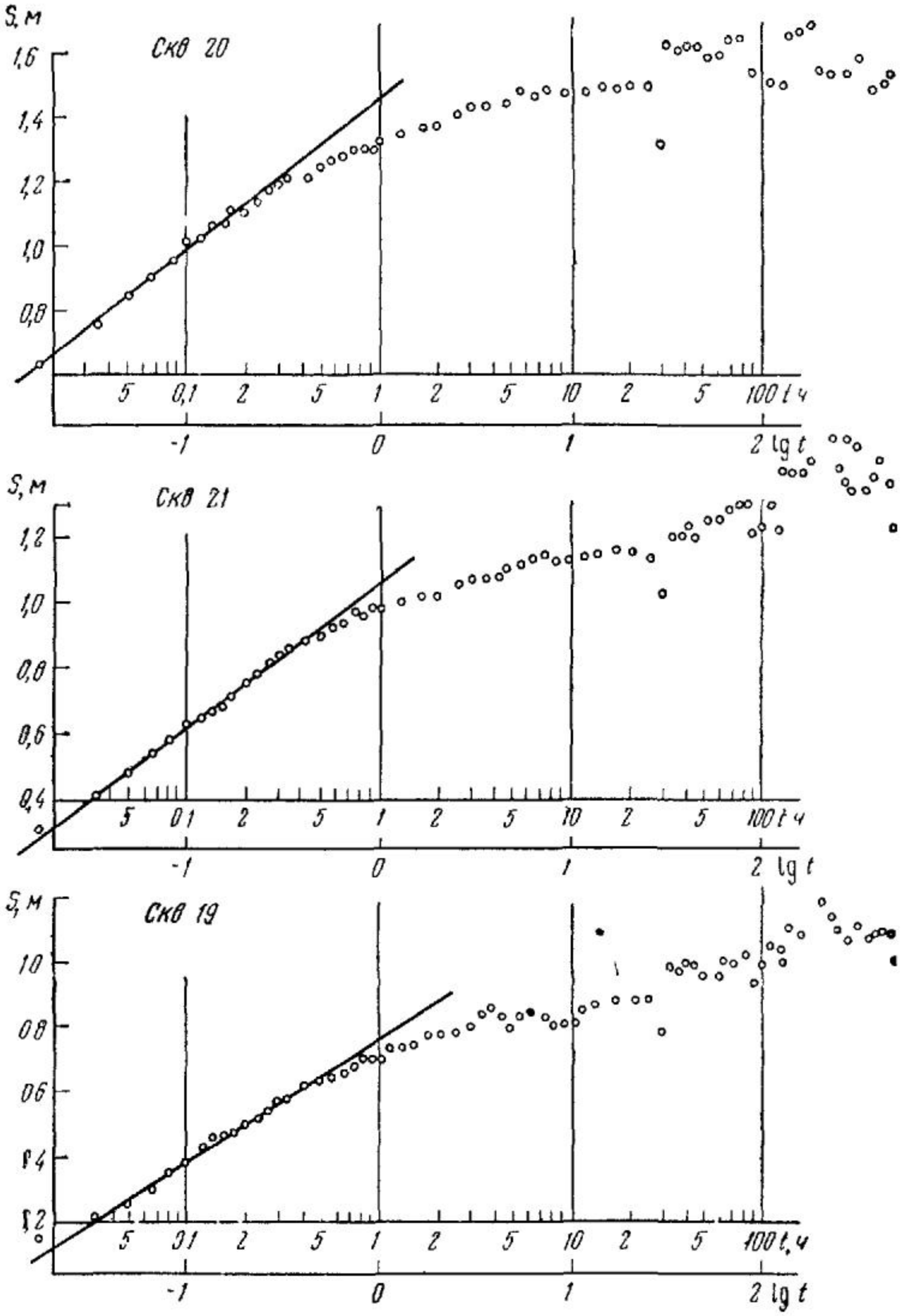



**Рис. 55. Графики временного прослеживания понижения при опробовании сложнослоистой толщи кустом 15.**

Скв. 20: $r = 16$ м, $km = 3370$ м²/сутки, $a = 3{,}5 \cdot 10^6$ м²/сутки, скв. 21: $r = 36$ м, $km = 3480$ м²/сутки, $a = 3{,}3 \cdot 10^6$ м²/сутки скв. 19. $r = 84$ м, $km = 4120$ м²/сутки, $a = 7{,}6 \cdot 10^6$ м²/сутки

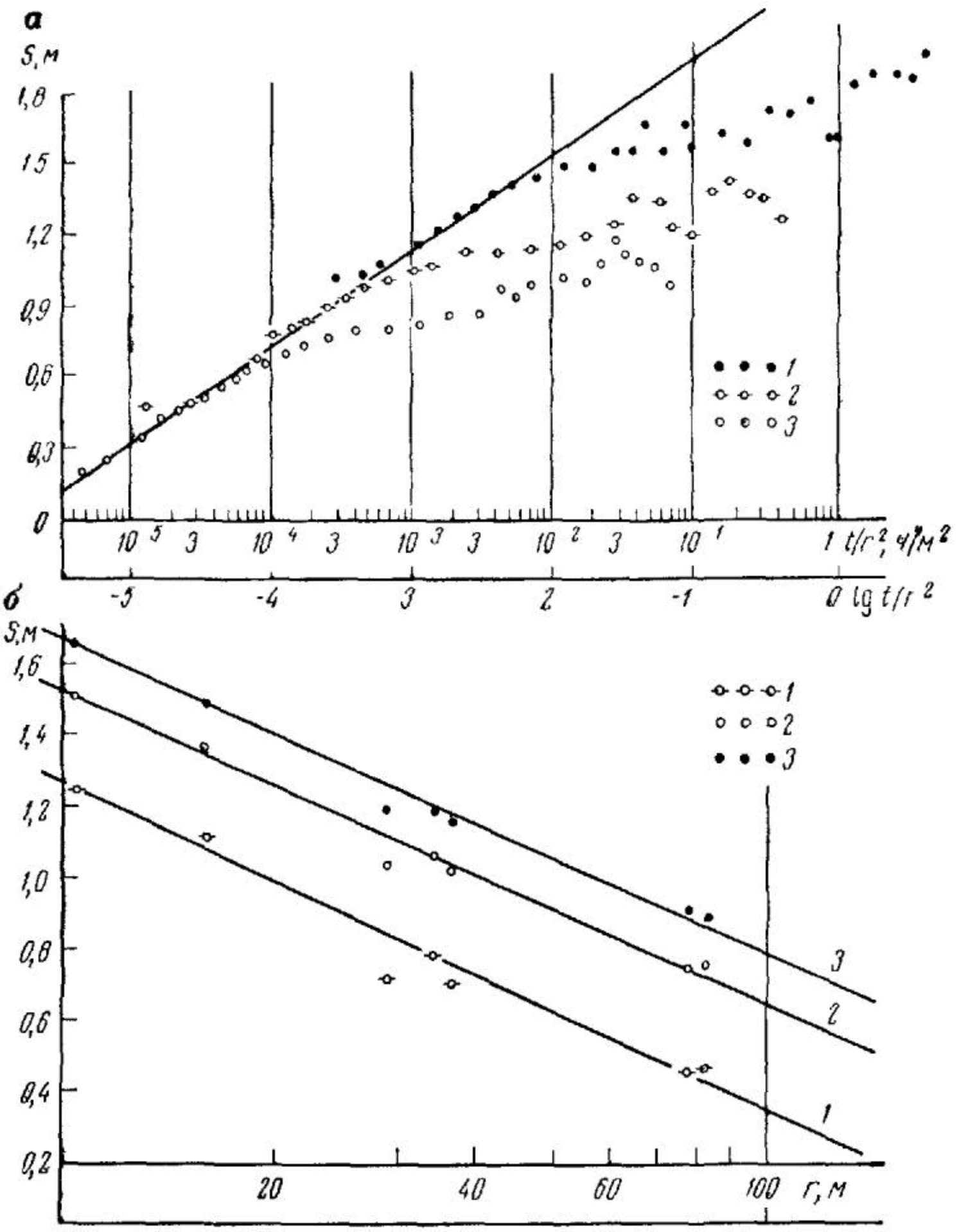



Рис. 56. Прослеживание понижения при опробовании сложнослоистой толщи кустом 15.

*а* — графики комбинированного прослеживания, луч I при расстоянии *r* наблюдательных скважин: *1* — 10 м, *2* — 34 м, *3* — 84 м; *б* — графики площадного прослеживания на моменты *t*: *1*— 0,17 ч, *2*— 1,67 ч, *3* — 16,7 ч

| Способ обработки | № прямой | $Q$, м³/сутки | $C$ | $km$ | $A$ | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S-\lg\frac{t}{r^2}$ | 1 | 8550 | 0,41 | 3820 | 2,38 | $6{,}7\cdot10^6$ |
| $S-\lg r$ | 1 | 8550 | 0,90 | 3480 | 2,16 | $4{,}0\cdot10^6$ |
| | 2 | 8550 | 0,85 | 3680 | 2,36 | $2{,}3\cdot10^6$ |
| | 3 | 8550 | 0,86 | 3640 | 2,52 | $4{,}6\cdot10^5$ |

обработки получены следующие средние по кусту значения параметров (табл. 23).

Таблица 23

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| $S - \lg t$ | 3780 | $4.5 \cdot 10^6$ |
| $S - \lg r$ | 3820 | $6.7 \cdot 10^6$ |
| $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | 3480 | $4{,}0 \cdot 10^6$ |

Оба параметра, полученные при всех способах обработки, достаточно близки между собой. Следовательно, выбранный начальный участок действительно описывается уравнением Джейкоба, а найденные параметры являются суммарными и средневзвешенными характеристиками вскрытой части слоистого разреза.

До сих пор мы рассматривали варианты, при которых пьезометрические уровни отдельных слоев практически совпадали, так что понижение происходило от общей пьезометрической поверхности и, следовательно, в каждый момент времени понижения напора для каждого слоя были равны между собой. В практике опробования возможны случаи, когда разобщенные слои имеют существенно различные статические уровни. Взаимодействие между такими слоями при их совершенном вскрытии будет сложнее. Как показано в работе [49], при совместном опробовании двух водоносных пластов вследствие разности уровней возникает аномалия формы временных графиков прослеживания. При прослеживании понижения представительным будет конечный участок графика. Очевидно, сочетание двух этих факторов аномальности (влияние перетока и разности уровней) значительно осложнило бы выбор представительного участка. Однако такие сочетания редки, поскольку разность уровней может быть при плотных разделяющих прослоях, а переток, ощутимый в короткий отрезок времени, возможен при их достаточной проницаемости.

С точки зрения пределов применимости суммарных и средневзвешенных параметров сложнослоистых толщ при прогнозном расчете целесообразно рассмотреть некоторые возможные варианты природных схем.

1. Сложнослоистая толща залегает под толщей слабопроницаемых пород, притоком из которых можно пренебречь. Эксплуатационное понижение можно ограничить напором до кровли сложнослоистой толщи. Пьезометрическая поверхность слоистой толщи является практически общей для основных водоносных слоев. В этих условиях необходимы и достаточны для прогнозного расчета суммарный коэффициент водопроводимости и средневзвешенный — пьезопроводности.

Эти величины, как было показано, можно определить методом Джейкоба по начальным участкам.

2. Сложнослоистая толща залегает у поверхности. Пьезометрическая поверхность всех прослоев общая. Эксплуатационное понижение значительно больше напора над кровлей проницаемого прослоя. В данном случае, к которому относится описанное Урулюнгуйское месторождение, условия опыта при совершенном вскрытии не соответствуют условиям эксплуатации. Опыт производился при напорности всех или большинства водопроницаемых прослоев, при эксплуатации же верхние прослои будут осушаться. Величина понижения уровня будет определяться гравитационной водоотдачей осушаемых прослоев.

Суммарный коэффициент водопроводимости, усредненный коэффициент фильтрации и средневзвешенный — пьезопроводности являются необходимыми, но недостаточными параметрами. Для прогнозного расчета требуется водоотдача проницаемых прослоев.

3. Несовершенное вскрытие слоистой толщи. Вскрыты нижние, наиболее проницаемые прослои при прочих равных условиях. Опытные закономерности заключают участки ложной стабилизации. Эксплуатационное понижение не больше напора над кровлей верхнего из вскрытых проницаемых прослоев. Суммарный коэффициент водопроводимости вскрытой части разреза и средневзвешенный коэффициент пьезопроводности, определенные методом Джейкоба по начальным участкам, необходимы, но недостаточны для прогнозного расчета.

Подобные условия можно схематизировать, как двух- или трехслойную толщу и осушение верхней части разреза учесть в приведенной уровнепроводности, для чего можно воспользоваться методом В. А. Мироненко, Л. И. Сердюкова и определить приведенную водоотдачу. Однако в каждом отдельном случае необходимы доказательства допустимости принимаемой схемы. В случае представительности второго участка можно попытаться обработать опытные данные с помощью точных решений и определить фактор перетока.

Прогнозный расчет необходимо производить тогда в соответствии со схемами, принятыми при обработке опытных данных.

## 3. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ОПЫТНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА СТАДИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УРОВНЯ

Соображения об основных принципах интерпретации опытных данных в слоистых толщах, изложенные выше, предполагают информацию, полученную на стадии понижения. Эти соображения можно отнести и к восстановлению уровня, но только в тех случаях, когда влияние перетока не ощущается в продолжение опыта ни на стадии понижения, ни на стадии восстановления уровня. В тех же случаях, когда это влияние ощутимо, информация о фильтрационных и емкостных свойствах испытуемого пласта, получаемая на стадии восстановления, претерпевает дополнительное искажение. Оно заключается в том, что к истинным величинам повышения уровня после остановки

откачки добавляется повышение за счет продолжающегося перетока, который происходит до тех пор, пока существует необходимый напорный градиент. Таким образом, фактические повышения уровня окажутся завышенными, причем степень завышения будет переменной убывающей во времени. Следствием этого является увеличение угловых коэффициентов временных графиков и занижение коэффициентов водопроводимости.

Вероятность и величина ошибок практически неопределяемы, поэтому пользоваться *только способами прослеживания* восстановления для определения параметров ненадежно. Если же имеются определения по данным прослеживания понижения и восстановления, причем обнаруживаются систематические занижения результатов, найденных по восстановлению, предпочтение при выборе расчетных параметров отдается результатам, полученным по понижению.

Таким образом, при опробовании слоистых толщ способы прослеживания понижения и восстановления уровня не являются равноценными. Способ прослеживания восстановления уровня оказывается менее надежным.

Суммируя результаты анализа опытных закономерностей в условиях неоднородности фильтрационных свойств в разрезе, необходимо сделать следующие выводы.

1. Взаимодействие водоносных прослоев при опробовании является фактором положительной аномальности временных и комбинированных графиков прослеживания, причем фактором, практически нерегулируемым ни при постановке, ни при проведении опыта. Рекомендации, существующие на этот случай в литературе [93], не могут гарантировать получения всех параметров, необходимых для прогнозного расчета с учетом перетекания, каким-либо одним методом обработки. При выборе способов обработки необходимо руководствоваться видом полученной опытной закономерности понижения.

2. При отсутствии признаков перетока, которыми могут служить форма временных и комбинированных графиков и сходимость результатов комбинированного и площадного прослеживания, основные параметры, определяемые методом Джейкоба, являются необходимыми и достаточными для прогнозного расчета с игнорированием перетока. В остальных случаях эти параметры необходимы, но недостаточны.

3. Сложнослоистые толщи целесообразно опробовать суммарно при совершенном вскрытии. Основные параметры, определяемые в этих условиях методом Джейкоба, являются необходимыми и достаточными, если эксплуатационное понижение к концу расчетного срока не превышает напора над кровлей верхнего проницаемого слоя. В остальных случаях эти параметры необходимы, но недостаточны.

4. Способы прослеживания понижения и восстановления уровня в условиях взаимодействия слоев не являются равноценными. Способы прослеживания восстановления менее надежны. При наличии признаков перетока обработку опытных данных следует производить способом прослеживания понижения.

5. При наличии плановых границ интерпретация опытной информации в слоистых водоносных пластах может производиться в соответствии с критериями, разработанными для пластов однородных в разрезе.

6. При выдержанных глинистых разделяющих слоях ($K < 10^{-4}$ м/сутки) эффект взаимодействия слоев ощутимо проявляется через длительный промежуток времени. Обработка таких случаев методом Джейкоба не встречает трудностей.

Глава 8

# ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ГРАНИЦ

В главе 4 изложена методика обработки результатов опытных работ в ограниченных пластах, когда в процессе откачек (выпусков) могут быть получены участки опытных закономерностей, свободные от влияния границ. При этом параметры определяются по зависимости для неограниченного пласта. Такие случаи наиболее благоприятны для обработки данных откачек и расчета параметров.

Однако в практике проведения изысканий нередко с самого начала откачек опытные закономерности (исключая возмущающие и ближайшие наблюдательные скважины) уже отражают в себе влияние границ, либо начальные участки временных закономерностей оказываются мало представительными.

Таким образом, возникает задача обработки опытной информации для определения эмпирического закона изменения уровня или расчетных параметров по зависимостям, учитывающим влияние различных либо непроницаемых и слабо проницаемых границ, либо границ постоянного напора, а также локализированных очагов разгрузки, ограниченной по величине. В последнем случае условия на границе могут в процессе опытов изменяться (граница $H = \text{const}$ постепенно переходит в границу $Q = \text{const}$). Характер действующих при откачках границ определяется реальной гидрогеологической и геологической обстановкой (очаги разгрузки подземных вод, выклинивание водоносных пластов, резкие литологические контакты, наличие экранирующих или проводящих разрывных нарушений и пр.).

Обработку опытных данных в условиях влияния границ наиболее целесообразно выполнять на основе уравнения Тейса — Джейкоба, преобразованного для соответствующих условий, там где это уравнение неприменимо по возможности использовать аналогичные графоаналитические методы, основанные исключительно на анализе опытных закономерностей изменения уровня.

Из всего многообразия природной обстановки могут быть выделены следующие наиболее характерные случаи *:

---

* Участки, ограниченные реками, водохранилищами, каналами и пр. (границы постоянного напора) рассматриваются отдельно в главе 9.

1. Участки, ограниченные непроницаемыми границами:
1) одна или две взаимно пересекающиеся границы (полуограниченный или углообразный пласт);
2) полосообразный пласт;
3) замкнутый пласт.
2. Участки с границами неоднородности:
1) прямолинейная граница раздела;
2) круговая граница раздела.
3. Участки вблизи локализованных очагов разгрузки подземных вод.
4. Участки в пластах со сложной конфигурацией разнородных границ.

## 1. УЧАСТКИ, ОГРАНИЧЕННЫЕ НЕПРОНИЦАЕМЫМИ ГРАНИЦАМИ

### Одна или две взаимопересекающиеся границы

Данная группа условий включает в себя полуограниченные пласты, пласты-квадранты, а также пласты с границами более сложной конфигурации, когда в процессе опыта существенное влияние оказывают лишь одна или две ближайшие границы. Контактирующие породы практически непроницаемы. Влияние границ в расчетах, основанных на принципе суперпозиции, обычно учитывается введением соответствующего количества отраженных скважин одинаковой интенсивности [45, 165]. Методика расчета параметров в таких условиях подробно изложена в работе [106].

Временны́е графики в полулогарифмическом масштабе в условиях, когда действующие границы могут быть заменены конечным числом отражений, представляют собой прямые с угловыми коэффициентами бо́льшими по сравнению с условиями неограниченного пласта.

Характер и степень аномальности определяются конфигурацией границ или формой пласта, т. е. количеством отражений скважин, которыми заменяется влияние границ.

Общее правило для определения числа отражений в зависимости от величины угла действующего сектора пласта выражается следующей формулой [165]:

$$n = \frac{360}{\theta} - 1. \qquad (8.1)$$

Отсюда число отражений $n$ в секторах с углами $\theta$ будет равно:

| $\theta$ | 180° | 120° | 90° | 60° | 45° | 30° |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n$ | 1 | 2 | 3 | 5 | 7 | 11 |

Выражение для понижения уровня в углообразном пласте имеет вид [106]:

$$S = \frac{M \cdot Q}{km} \lg \frac{2{,}25at}{(r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \ldots \rho_n)^i}, \tag{8.2}$$

где $r$, $\rho_1$, $\rho_2$, . . ., $\rho_n$ — расстояние от точки, в которой определяется понижение, до опытной и отраженных скважин;

$$M = 0{,}183\,(n+1); \quad i = \frac{2}{n+1}. \tag{8.3}$$

Формулы Ф. М. Бочевера [22] для полуограниченного пласта и пласта-квадранта являются частным случаем выражения (8.2).

Структура формулы (8.2) свидетельствует о линейной зависимости между понижением и логарифмом времени.

Угловые коэффициенты временных графиков определяются выражением:

$$C = \frac{M \cdot Q}{km}. \tag{8.4}$$

Отсюда соотношение угловых коэффициентов временных графиков в условиях ограниченного и неограниченного пласта кратно общему числу учитываемых в расчете скважин (реальной и фиктивных):

$$\frac{C_{II}}{C_I} = n + 1. \tag{8.5}$$

Соответствующее занижение водопроводимости будет допущено при расчете параметров в условиях влияния границ по формулам для безграничного пласта.

Если известны положение и характер границ исследуемого участка, параметры могут быть рассчитаны по следующим зависимостям [106]:

$$km = \frac{M \cdot Q}{C} \tag{8.6}$$

$$\lg a = i \lg (r \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \ldots \cdot \rho_n) - 0{,}35 + \frac{A}{C}. \tag{8.7}$$

Принципы определения местоположения отраженных скважин иллюстрируются рис. 57, *а*, заимствованном из работы [165]. В общем случае отражение производится по окружности до совмещения последнего отражения с реальной скважиной. Поэтому приведенные правила справедливы для углов кратных 360°. В противном случае надо принимать величину угла округленно (кратной 360°). Для упрощения процесса нахождения отражений можно производить последовательное зеркальное отражение по окружности всего угла до последнего совмещения отраженных и реальных границ (рис. 57, *б*).

Рассчитанные по приведенным зависимостям параметры будут настолько соответствовать действительным параметрам пласта, насколько реальная конфигурация границ соответствует принятой расчетной схеме.

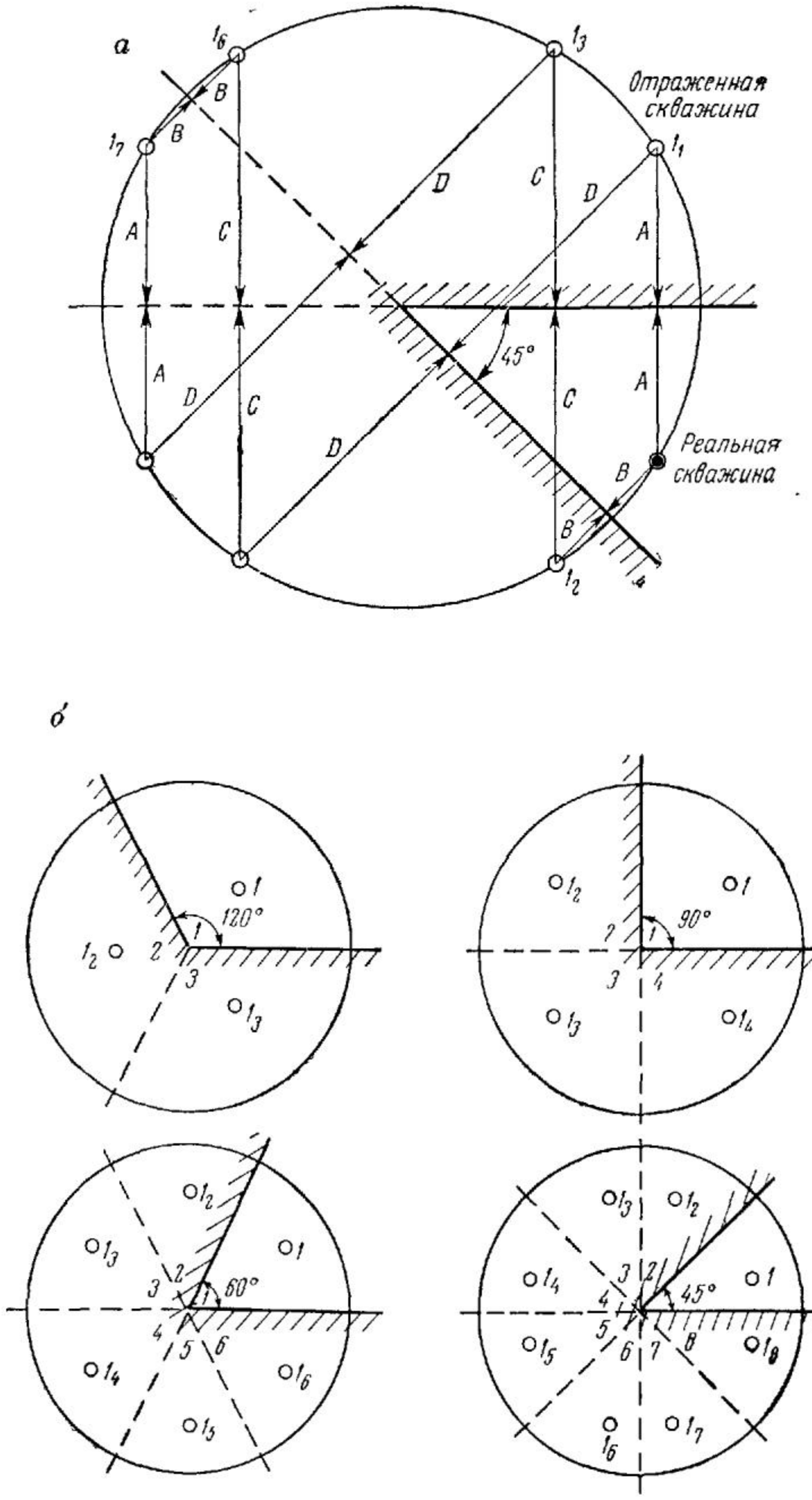



**Рис. 57. Схема для определения отображений в угловом пласте:**

*а* — отображение скважины (по Феррису); *б* — отображение угла

Если по какой-либо из наблюдательных скважин получен начальный участок графика, свободный от влияния границ, то по соотношению угловых коэффициентов начального и конечного участков можно также судить насколько принятая схема близка к природной обстановке.

В общем случае при использовании приведенных формул может быть получено более точное значение водопроводимости и менее точное пьезопроводности.

Примером расчета параметров с использованием опытной закономерности, отражающей влияние одной непроницаемой границы, может служить обработка данных по опытному кусту 35 на Мийкайнарском участке (см. главу 6).

Характерной особенностью временны́х графиков в условиях влияния непроницаемых границ является то, что они не диагностируются по форме, т. е. по одному виду графиков не всегда можно установить, отражают ли они влияние границы. Как показано в главе 4, критерием этого могут служить графики $km = f(\overline{r})$.

Обработка опытны́х данных способом площадного и комбинированного прослеживания в условиях влияния границ нецелесообразна, так как при вычислении приведенного расстояния будут возникать дополнительные погрешности, связанные с неточностью определения расстояния до отображенных скважин.

## Полосообразный пласт

Условия работы скважины в полосообразном пласте отличаются от предыдущих условий тем, что здесь наблюдается нелинейная зависимость понижения от времени. Поэтому изложенные ранее способы временно́го, площадного и комбинированного прослеживания, основанные на полулогарифмической анаморфозе кривой снижения уровня, в полосообразном пласте не применимы.

В общем виде в полосообразном и замкнутом пластах зависимость понижения уровня от времени является степенной:

$$S = A + Bt^c. \tag{8.8}$$

В полосообразных пластах величина изменения понижения уровня связана с квадратным корнем из времени [22]:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left\{\frac{2\pi\sqrt{at}}{L}F(v) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2}\ln\frac{e^{\frac{2\pi x}{L}}}{\sqrt{\left[\operatorname{ch}\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi(y+\lambda)}{L}\right]\left[ch\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi(y-\lambda)}{L}\right]}}\right\}, \tag{8.9}$$

где

$$F(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-v^2} - v\,erfc(v); \tag{8.10}$$

ег $fc(v) = 1 - \Phi(v)$; $\Phi(v)$ — интеграл вероятности

$$v = \frac{x}{2\sqrt{at}}. \tag{8.11}$$

Поскольку второе слагаемое в фигурных скобках выражения (8.9) не зависит от времени, эта часть понижения уровня по истечении времени, определяемого критерием (8.12), становится постоянной

$$t \geqslant 0{,}5\frac{L^2}{a} \tag{8.12}$$

Такие условия характерны, например, для крыльев наложенных мульд в Центральном Казахстане, ширина которых обычно составляет 500—1000 м, а иногда значительно меньше (100—200 м). При $L = 1000$ м и $a = 10^5$ м$^2$/сутки $t \geqslant 0{,}5\frac{(1000)^2}{10^5} \geqslant 5$ суток.

Условие (8.12) может быть достигнуто во многих случаях уже через несколько суток после начала откачки.

При

$$\frac{x}{2\sqrt{at}} \leqslant 0{,}05, \tag{8.13}$$

с точностью до 10% $F(v) = 0{,}56$.

Условие (8.13) при $a = 10^5$ м$^2$/сутки уже через 10 суток соблюдается для $x \leqslant 100$ м.

При соблюдении условий (8.12) и (8.13) уравнение (8.9) может быть представлено в виде [88]:

$$S = C\sqrt{t} + A, \tag{8.14}$$

где

$$A = \frac{Q}{4\pi km}\ln \times$$

$$\times \frac{e^{\frac{2\pi x}{L}}}{\left[ch\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi(y+\lambda)}{L}\right]\left[ch\frac{\pi x}{L} - \cos\frac{\pi(y-\lambda)}{L}\right]}, \tag{8.15}$$

$$C = \frac{Q\sqrt{a}}{kmL}\cdot 0{,}56. \tag{8.16}$$

Уравнение (8.14) в координатах $S - \sqrt{t}$ представляет собой уравнение прямой линии, $C$ — угловой коэффициент графика, $A$ — его начальная ордината

$$C = \frac{S_2 - S_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}}. \tag{8.17}$$

Определение коэффициента водопроводимости из выражения (8.15) нецелесообразно, так как оно весьма громоздко и содержит много членов, снижающих точность расчетов. Кроме того, из этого выражения водопроводимость определяется по абсолютной величине

понижения в одной точке, что по существу лишает этот способ всех преимуществ графоаналитических методов расчета.

Величина коэффициента водопроводимости может быть определена по полулогарифмическим графикам временно́го прослеживания снижения уровня по ближним к опытной наблюдательным скважинам по самому начальному периоду откачки, когда влиянием границ полосообразного пласта еще можно пренебречь.

Напротив, точность определения пьезопроводности по ближним скважинам весьма мала из-за деформации потока в окрестности скважины. Кроме того, в трещиноватых породах, которыми очень часто сложены полосообразные пласты, по ближайшим к опытной наблюдательным скважинам точность определения уровнепроводности вообще неудовлетворительна.

В целом точность расчета коэффициента водопроводимости по сравнению с пьезопроводностью по временны́м графикам обычно выше (особенно в трещиноватых породах). Это связано с тем, что первый определяется по темпу изменения уровня и не зависит от абсолютной величины понижения.

Преимущество использования для определения коэффициента пьезопроводности графиков $S = f(\sqrt{t})$ заключается в том, что в условиях влияния границ полосообразного пласта коэффициент пьезопроводности может быть также определен по темпу изменения уровня из выражения:

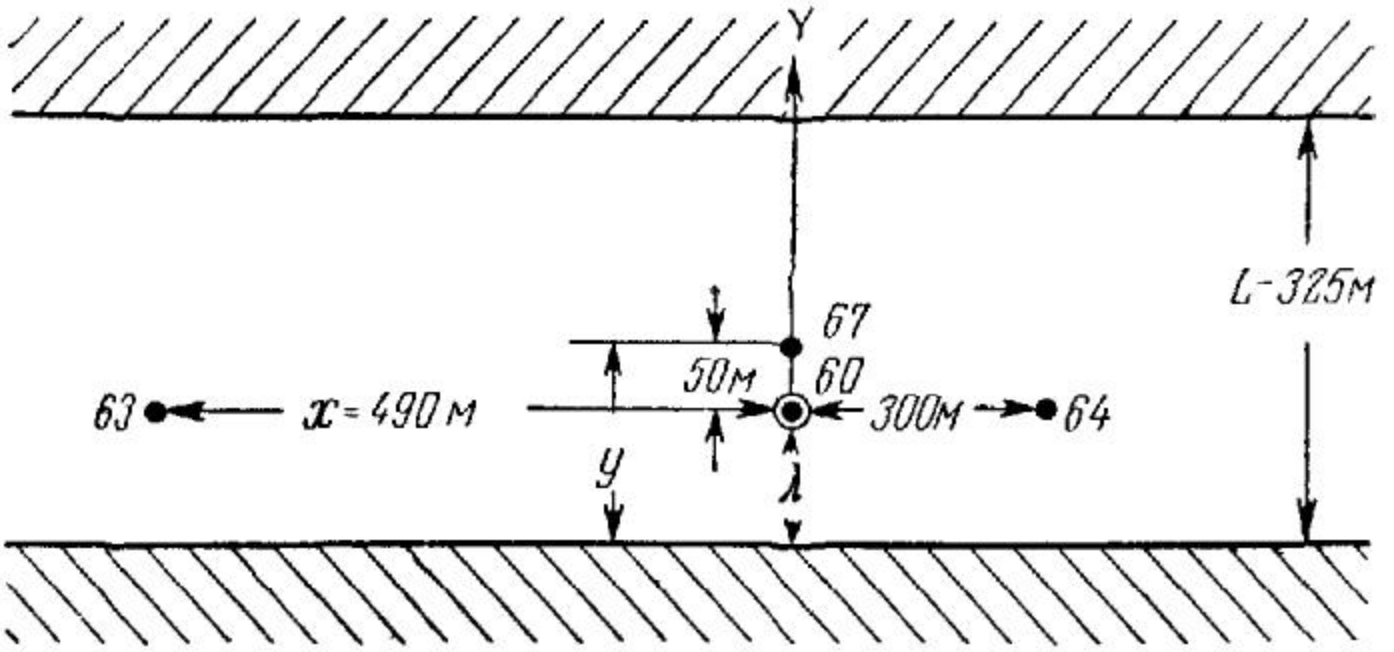
$$\sqrt{a} = 1{,}78\,\frac{km \cdot L \cdot C}{Q}. \qquad (8.18)$$

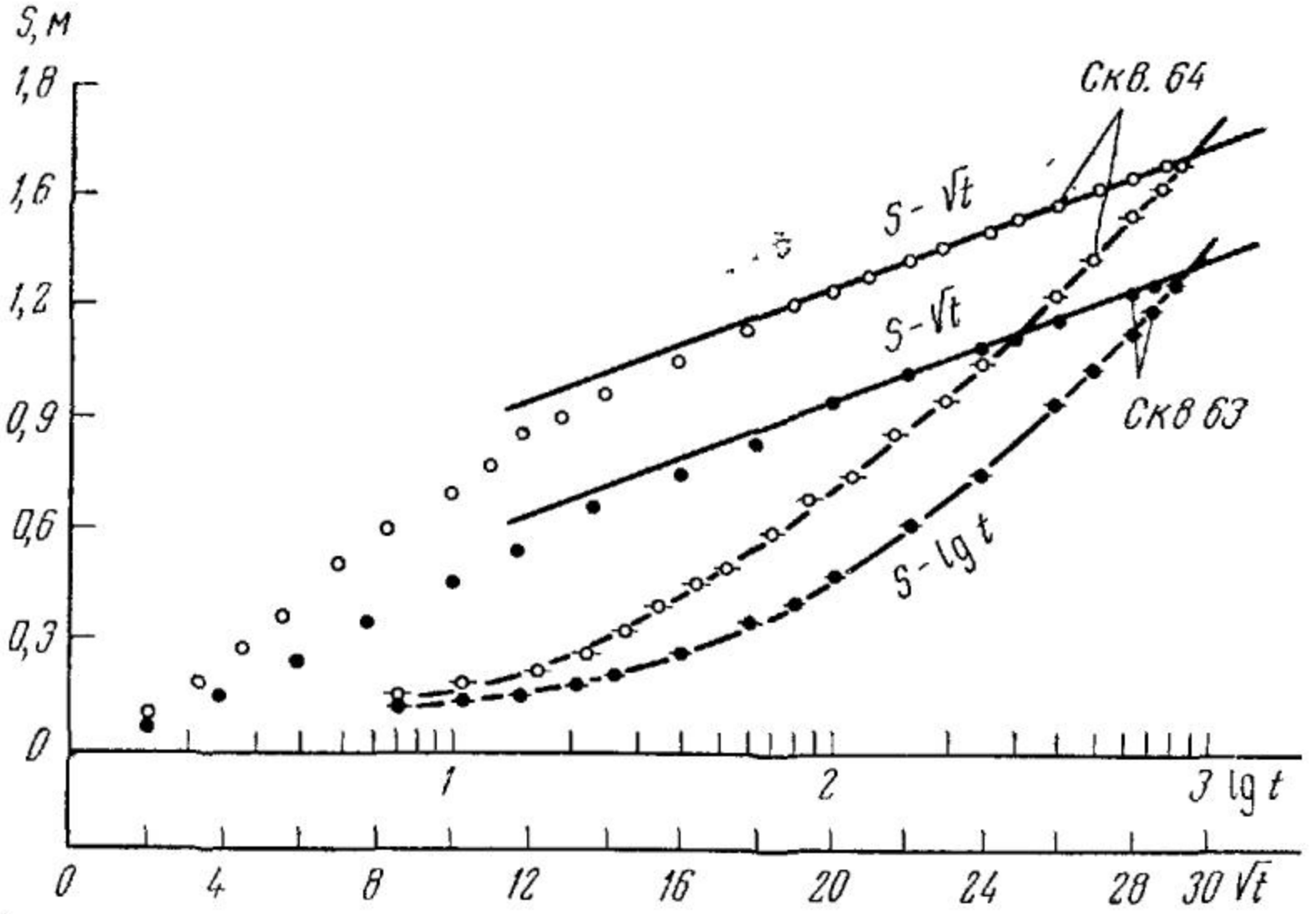
Применение изложенной методики рассмотрим на примере северного крыла Коксенгирсорской мульды (Северный Казахстан).

Опытно-эксплуатационной откачкой из скважины 60 опробовался безнапорный водоносный горизонт, сложенный трещиноватыми и закарстованными известняками турнейского возраста. Они залегают практически вертикально в виде полосы широтного простирания шириной на участке опробования 300—350 м. Контактирующие породы представлены весьма слабо трещиноватыми осадками ордовика и визейского яруса нижнего карбона. Схема опытного куста 60 и характер изменения опытных закономерностей во времени показаны на рис. 58.

В координатах $S - \lg t$ графики снижения уровня представляют собой плавные кривые параболической формы всюду выпуклые вниз. Это свидетельствует о нелинейной зависимости понижения от логарифма времени. В координатах $S - \sqrt{t}$ графики становятся прямолинейными. Критерием наступления квазистационарного режима является параллельность графиков по различным наблюдательным скважинам. Поэтому для применения данного метода необходимо иметь несколько наблюдательных скважин, поскольку прямолинейность отдельно взятого графика может быть видимой.

В данном случае графики параллельны, что свидетельствует о наступлении квазистационарного режима. Значение коэффициента



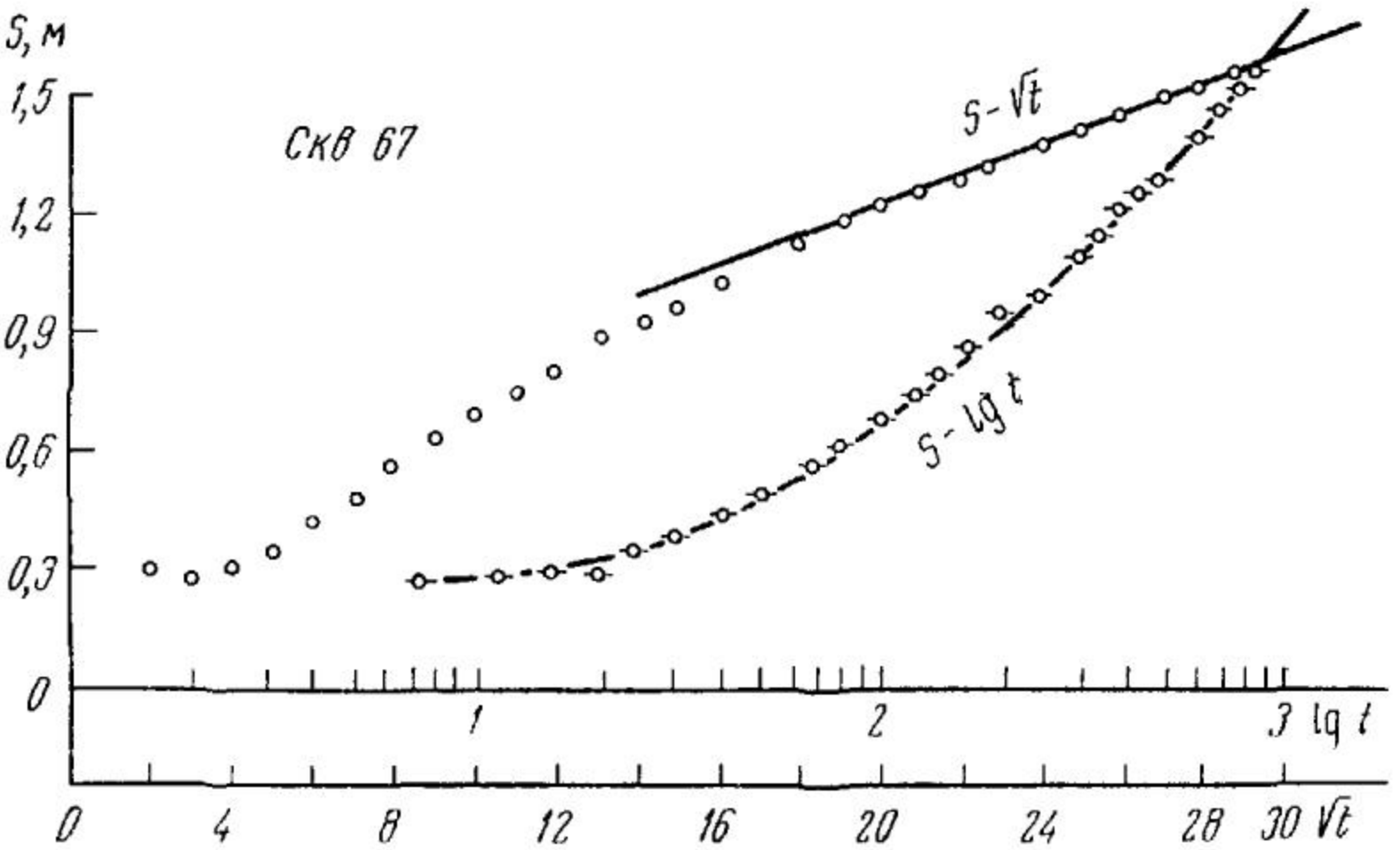




Рис. 58. Схема опробования пласта-полосы и графики временного прослеживания понижения для куста 60 (Северный Казахстан, 1964 г.)..

водопроводимости было определено по начальному периоду откачки до начала влияния границ полосы по скважине 67 и составило 1200 м²/сутки.

Исходные данные для расчета коэффициента уровнепроводности: $Q = 970$ м³/сутки; $L = 325$ м; $km = 1200$ м²/сутки; $\sqrt{a} = 1{,}78\,\frac{1200 \cdot 0{,}04 \cdot 325}{970} = 28{,}8$; $a = 835$ м²/ч $= 2 \cdot 10^4$ м²/сутки; $\mu = 0{,}06$.

Полученное довольно высокое значение водоотдачи связано с тем, что в данном случае понижения уровня не выходили за пределы зоны сезонных колебаний [115]. В этой зоне карстующиеся породы характеризуются обычно повышенной водоотдачей.

Кроме того, следует иметь в виду, что обычно определение уровнепроводности производится по абсолютной величине понижения, что приводит в трещинно-карстовых породах к более или менее его существенному завышению, а следовательно, к занижению водоотдачи (см. главу 6).

### Замкнутый пласт

В замкнутых пластах с круговой или близкой к круговой границей зависимость понижения уровня от времени является линейной и определяется выражением [29]:

$$S \approx \frac{Q}{\pi km} \cdot \frac{at}{R_к^2} + \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_к}{r^*}; \qquad (8.19)$$

$R_к$ — радиус кругового контура. $R_к = \sqrt{\frac{F_{пл}}{\pi}}$ ($F_{пл}$—площадь пласта). $r^*$ — приведенное расстояние от опытной скважины или центра водозабора до точки, в которой определяется понижение.

Уравнение (8.19) справедливо при условии [22]:

$$t \geqslant (1-1{,}5)\,\frac{R_к^2}{a}. \qquad (8.20)$$

На основе уравнения (8.19) наиболее удобно, как и в полосообразном пласте, определять коэффициенты пьезопроводности (уровнепроводности) или водоотдачи, так как они также могут быть определены не по абсолютной величине, а по темпу изменения уровня.

С момента времени, определяемого критерием (8.20), устанавливается линейная зависимость скорости понижения уровня от времени.

Оценим примерную продолжительность этого периода. Если принять $R_к = 5000$ м, $a = 10^5$ м²/сутки, $t \geqslant (1-1{,}5)\,\frac{5000^2}{10^5} \geqslant 250-375$ суток. Таким образом, в условиях реальных замкнутых пластов для определения параметров с учетом влияния границ можно практически использовать лишь данные эксплуатации водозаборов.

В небольших замкнутых тектонических зонах этот период может быть значительно меньше.

Так, при $R_к = 1000$ м и $a = 10^5$ м$^2$/сутки $t \geqslant (1—1{,}5)\ \frac{1000^2}{10^5} \geqslant$ $\geqslant 10—15$ суток.

В этих условиях определение водоотдачи на основе уравнения (8.19) может быть выполнено по данным опытно-эксплуатационных длительных откачек.

Уравнение (8.19) представляет собой уравнение прямой линии:

$$S = Ct + A, \tag{8.21}$$

где $C$ — угловой коэффициент графика $S — t$;

$A$ — начальная ордината графика $S — t$.

$$A = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_к}{r^*}; \tag{8.22}$$

$$C = \frac{Q}{\pi km} \cdot \frac{a}{R_к^2}. \tag{8.23}$$

Учитывая, что $\frac{km}{a} = \mu$ и $\pi R_к^2 = F_{пл}$

$$C = \frac{Q}{F_{пл}\mu}. \tag{8.24}$$

По угловому коэффициенту $C$ графика $S — t$ может быть легко определена водоотдача пород:

$$\mu = \frac{Q}{F_{пл}C}. \tag{8.25}$$

Коэффициент $C$ определяется по графику $S — t$:

$$C = \frac{S_2 — S_1}{t_2 — t_1}. \tag{8.26}$$

Учитывая, что $S_2 — S_1 = \Delta S$ за период $t_2 — t_1 = \Delta t$, выражение (8.25) может быть представлено в виде:

$$\mu = \frac{Q\,\Delta t}{F_{пл}\,\Delta S}. \tag{8.27}$$

Таким образом, определение водоотдачи этим способом является по существу балансовым.

Точность определения водоотдачи из выражения (8.25) или (8.27) достаточно высока, так как определяется темпом изменения уровня и площадью водоносного горизонта.

Определение коэффициента водопроводимости из выражения (8.22) производить нецелесообразно, так как в исходную зависимость входит абсолютная величина понижения и приведенное расстояние.

Коэффициент водопроводимости следует определять стандартным способом, по периоду, когда влияние границ еще не сказывается. При этом следует иметь в виду, что в замкнутых пластах значения $km$ играют подчиненную роль по сравнению с величиной водоотдачи и могут определяться приближенно.

В условиях замкнутых структур с пресными подземными водами водоотбор редко обеспечивается лишь за счет осушения пород. Обычно часть его формируется за счет привлекаемых запасов (сокращение разгрузки и пр.). Если величина привлекаемых запасов не изменяется во времени, то для расчета понижения уровня справедливо уравнение [29]:

$$S \approx \frac{Q - Q_{доп}}{\pi km} \cdot \frac{at}{R_к^2} + \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R_к}{r^*}; \qquad (8.28)$$

где $Q_{доп}$ — величина привлекаемых запасов.

Тогда

$$\mu = \frac{Q - Q_{доп}}{C \cdot F}. \qquad (8.29)$$

Поэтому определение водоотдачи без учета $Q_{доп}$ может привести к ее существенному завышению [12].

Обработку данных опытно-эксплуатационной откачки в условиях практически замкнутого пласта рассмотрим на примере Щучинского участка в Северном Казахстане.

В пределах участка подземные воды приурочены к весьма неравномерно трещиноватым сильно метаморфизованным породам архея, представленным слюдисто-кварцевыми сланцами, кварцитами, амфиболитами, гранитогнейсами. В морфологическом отношении участок приурочен к блюдцеобразному понижению рельефа, выполненному четвертичными глинами и суглинками мощностью до 40—50 м. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков в пределах приподнятых элементов рельефа, окружающих понижение, где трещиноватые породы выходят на поверхность под маломощным чехлом дресвяно-щебнистых отложений. Основная разгрузка осуществляется в пределах понижения восходящей фильтрацией через глинистые отложения и фиксируется на поверхности мочажинами и солончаками.

Дебиты скважин колеблются в весьма значительных пределах. На общем фоне весьма слабо трещиноватых пород с дебитами скважин от десятых долей до 1—2 л/сек, встречаются единичные зоны повышенной трещиноватости, где дебиты скважин достигают 5—20 л/сек, а дебит скважины 48 в начале групповой опытно-эксплуатационной откачки достигал 80—90 л/сек.

В то же время имеется ряд совершенно безводных скважин, тяготеющих в основном к периферии участка. Некоторые из этих скважин вскрывают разломы барьерного типа. Один из таких выявленных разломов ограничивает участок с юго-востока.

Гидрогеологическая схема и разрез Щучинского участка представлены на рис. 59. Несмотря на большое количество скважин, пройденных на участке, не удавалось установить его гидродинамическую схему и эффективные параметры водоносного комплекса.

Участок был опробован двумя длительными опытно-эксплуатационными откачками. Первая откачка была проведена из скважин 40,

44 и 34 с суммарным расходом около 15 л/сек и проходила при стабильном режиме фильтрации.

Затем была проведена длительная семимесячная групповая откачка из скважин 48, 52, 108 и 109. В начале откачки расход достигал 115 л/сек. Первые три месяца расход систематически снижался,

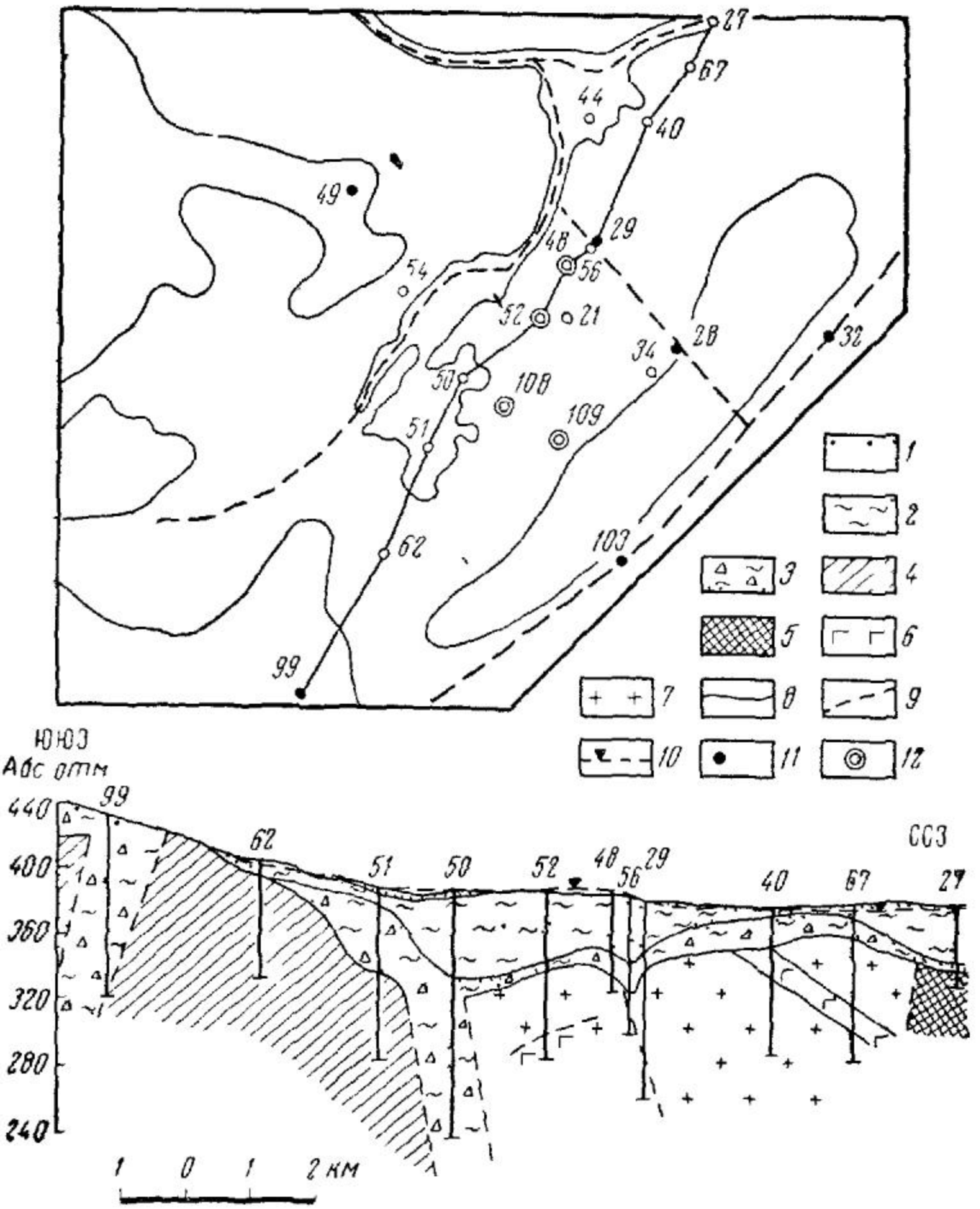



Рис. 59. Схема опробования и разрез в районе опытного куста (групповая откачка) 48, 52, 108, 109 (по данным В. Г. Склярова, 1968 г., Северный Казахстан).

*1* — песок, *2* — суглинок, *3* — щебнисто-глинистые отложения коры выветривания, *4* — глина, *5* — сланцы слюдисто-кварцевые, *6* — кварциты, *7* — амфиболиты, *8* — стратиграфические границы, *9* — тектонические нарушения, *10* — уровень подземных вод, *11* — безводные скважины, *12* — возмущающие скважины

а затем стабилизировался на уровне 87—90 л/сек. Одним из основных назначений откачки являлось определение закона изменения уровня во времени для установления гидродинамической схемы участка. На рис. 60 представлены характерные графики изменения уровня при этой откачке в координатах $S$ — $\lg t$ и $S$ — $t$. Первые представляют собой плавные кривые выпуклые вниз, что свидетельствует

о степенной зависимости между понижением и временем. Вторые прямолинейны, что характерно для замкнутого кругового пласта.

Таким образом, в процессе длительной откачки было установлено, что гидродинамические условия участка отвечают схеме «замкнутый пласт», хотя определение положения границ этого пласта достаточно условно. Величина углового коэффициента $C$ графиков $S - t$, определенная по 16 наблюдательным скважинам, расположенным в центральной части депрессионной воронки, составила в среднем $3 \cdot 10^{-2}$ м/сутки за последние 100 суток откачки. В периферийной части депрессионной воронки скорость снижения уровня была в 2—2,5 раза ниже.

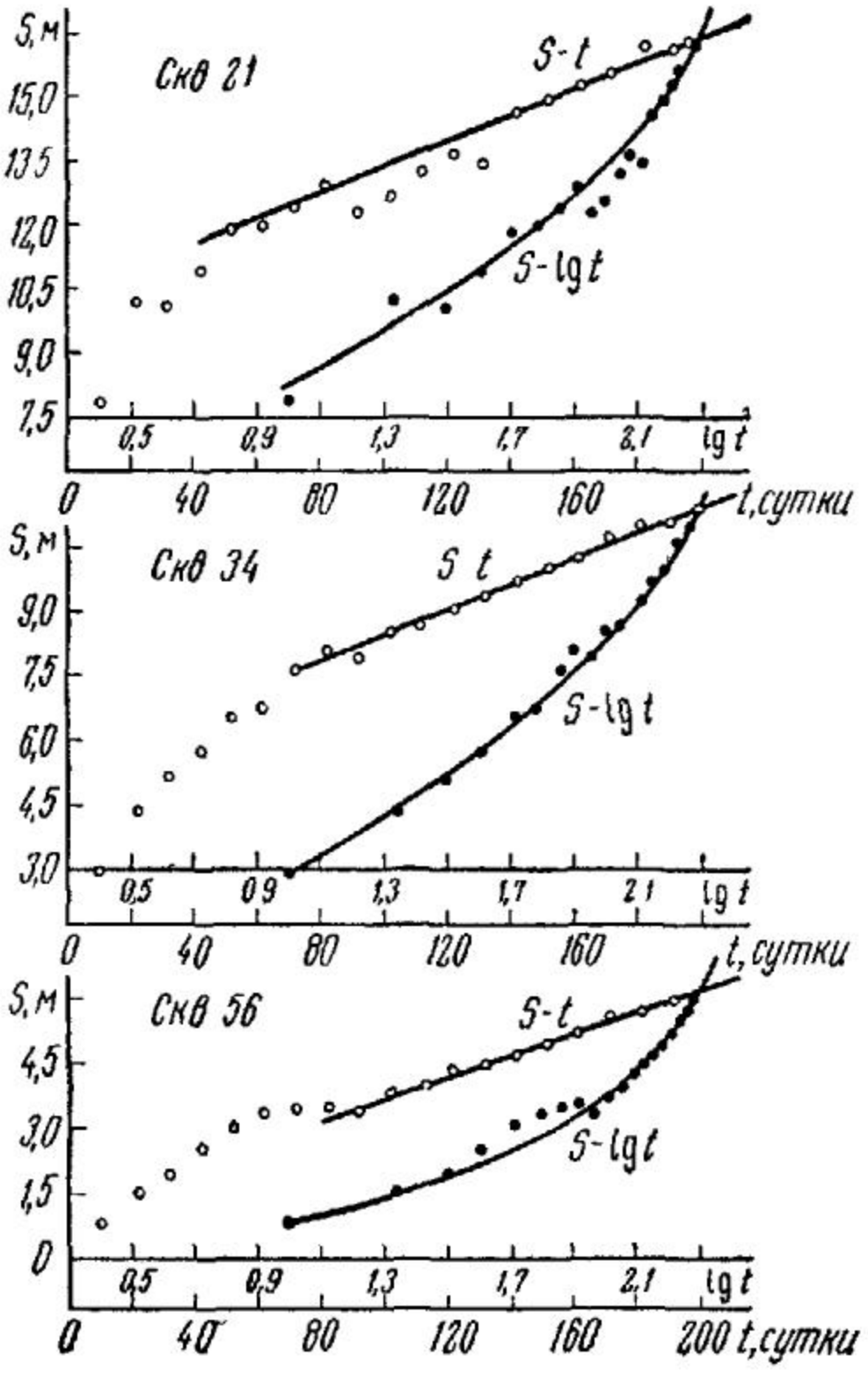



Рис. 60. Графики временного прослеживания при опробовании замкнутого пласта (условия см. на рис. 59)

При линейном законе снижения уровня в центральной части воронки депрессии приток с периферии незначителен и во времени практически не возрастает. Подавляющая доля расхода откачки формируется в центре участка, где развиты наиболее трещиноватые породы. Поскольку в процессе первой откачки при расходе 15 л/сек была достигнута стабилизация можно считать, что не менее 15 л/сек от общего расхода 90 л/сек было обеспечено за счет дополнительного питания, связанного с сокращением восходящей разгрузки. Используя графики $S - t$, может быть определена упругая водоотдача пласта по формуле (8.29), исключающей дополнительное питание.

Поскольку точное положение границ эффективно работающей зоны нам неизвестно, можно определить общее количество упругих запасов, содержащихся в слое единичной мощности в пределах этой зоны.

$$\mu^* F_{\text{пл}} = \frac{Q - Q_{\text{доп}}}{C} = \frac{6400}{3 \cdot 10^{-2}} = 2{,}13 \cdot 10^5 \text{ м}^2.$$

Оценивая площадь участка осушения приближенно в 40 км$^2$, получаем величину упругой водоотдачи $5 \cdot 10^{-3}$.

В первоначальный период этой откачки в течение 25—30 суток влияние границ было несущественно, поскольку графики $\frac{S}{Q} - \lg t$ в этот период имеют прямолинейную форму. Величина $km$, рассчитанная по этим графикам, составила около 250 м²/сутки. Близкое значение получено также по графику $S - \lg r$ на конец откачки. Полученные значения упругой водоотдачи и коэффициента водопроводимости позволили определить также коэффициент пьезопроводности ($5 \cdot 10^4$ м²/сутки).

Заметим, что в замкнутых круговых пластах определение основных гидрогеологических параметров может быть заменено расчетом показателя $C^*$, зависящего от водоотдачи и площади пласта и характеризующего скорость понижения уровня в единицу времени при единичном водоотборе. В приведенном примере

$$C^* = \frac{C}{Q - Q_{доп}} = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{6400} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-2}.$$

По существу полученный параметр $C^*$ позволяет выполнять необходимые прогнозные расчеты в замкнутых пластах.

## 2. УЧАСТКИ С ГРАНИЦАМИ ФИЛЬТРАЦИННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

При обработке данных опытных откачек зональная фильтрационная неоднородность может быть учтена лишь в простейших случаях (прямолинейная или круговая граница раздела). При более сложной неоднородности обычно определяют обобщенные параметры, комплексно характеризующие закономерность изменения уровня. При сложной хаотической неоднородности могут быть определены эффективные параметры, характеризующие усредненные фильтрационные свойства пласта в опробованной области.

### Прямолинейная граница раздела

Графоаналитический метод определения параметров в обеих зонах неоднородности предложен Л. В. Боревским и Л. С. Язвиным в работе [17]. Предложенный метод, основанный на принципе зеркального отображения источников (стоков) с новой интенсивностью, позволяет по данным откачки из скважины, расположенной в более проницаемой зоне, определить параметры не только этой, но и контактирующей с ней слабопроницаемой зоны.

Расчет параметров основан на решении В. А. Максимова для работы скважины в неоднородном пласте с одной прямолинейной границей раздела [75], которое в условиях квазистационарного режима приводится к следующему виду [17]:

$$S = \frac{Q}{4\pi (km)_{ср}} \left[ \ln \frac{2{,}25 a_1 t}{r\rho} + \alpha \ln \frac{\rho}{r} + \frac{(1+\alpha)\sigma_1}{2} \right]; \qquad (8.30)$$

$$\alpha = \frac{(km)_2}{(km)_1}; \quad (km)_{ср} = \frac{(km)_1 + (km)_2}{2}, \qquad (8.31)$$

где $(km)_1$ и $(km)_2$ — коэффициенты водопроводимости первой и второй зоны;

$a_1$ — коэффициент пьезопроводности первой зоны;

$r$ — расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до опытной;

$\rho$ — то же, до ее зеркального отображения относительно границы раздела;

$\sigma_1$ — функция, зависящая от соотношения водопроводимостей и пьезопроводностей и времени откачки; при равенстве коэффициентов пьезопроводности обеих зон она равна нулю; выражение для этой функции приведено в указанной работе В. А. Максимова.

Функция $\sigma_1$ переменна во времени, однако ее величина стабилизируется при $\frac{\rho^2}{4a_1 t} \leqslant 10^{-4}$. В практических расчетах последним слагаемым в квадратных скобках выражения (8.30) можно пренебречь ввиду его относительной малости по сравнению с другими членами, что в дальнейшем дает некоторое завышение при расчете коэффициента пьезопроводности.

Тогда выражение (8.30) может быть представлено в виде уравнения прямой

$$S = A + C \lg t:$$

$$C = \frac{0{,}183Q}{(km)_{\text{ср}}}; \tag{8.32}$$

$$A = C\left[\lg \frac{2{,}25a_1}{r \cdot \rho} + \alpha \lg \frac{\rho}{r}\right]. \tag{8.33}$$

Согласно приведенным формулам временные графики в координатах $S$ — $\lg t$ должны иметь прямолинейную форму. В зависимости от продолжительности откачки и расстояния от опытной скважины до наблюдательной и границы раздела на этих графиках могут выделяться один или два участка.

При этом возможны следующие случаи:

1) $\bar{r}_{\text{пр}} \geqslant 3$, на графике выделяются два участка: первый, соответствующий пласту с параметрами первой зоны; второй — средним параметрам пласта;

2) $\bar{r}_{\text{пр}} \leqslant 3$, на графике выделяется один прямолинейный участок, соответствующий средним параметрам пласта.

По наблюдательным скважинам, расположенным в первой зоне, по временным графикам можно определить водопроводимость обеих зон и пьезопроводность первой зоны. В первом случае это может быть выполнено по одной наблюдательной скважине, во втором по двум.

Порядок расчета параметров следующий.

Первый случай. По первому прямолинейному участку графика определяются параметры первой зоны, далее определяется

угловой коэффициент второго участка графика $C'$ и рассчитывается $(km)_{ср}$ по формуле

$$(km)_{ср} = \frac{0{,}183Q}{C'}. \qquad (8.34)$$

При известных $(km)_{ср}$ и $(km)_1$ находится $(km)_2$ из формулы (8.31).

Второй случай. Для расчета используются графики $S$ — lg $t$ по двум наблюдательным скважинам. Первоначально определяется $(km)_{ср}$ по формуле (8.34); далее рассчитывается величина $\alpha$ по формуле:

$$\alpha = \frac{\frac{A_1}{C_1} - \frac{A_2}{C_2} \cdot \lg \frac{\rho_2 r_2}{\rho_1 r_1}}{\lg \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}}, \qquad (8.35)$$

где $A_1$ и $C_1$, $A_2$ и $C_2$ — соответственно параметры графиков $S \div \lg t$ для первой и второй наблюдательных скважин.

Определив $\alpha$ и $(km)_{ср}$, рассчитываются $(km)_1$ и $(km)_2$:

$$(km)_1 = \frac{2(km)_{ср}}{1+\alpha}; \quad (km)_2 = \alpha (km)_1. \qquad (8.36)$$

Коэффициент пьезопроводности первой зоны определяется по формуле:

$$\lg a_1 = \frac{A}{C} - 0{,}35 + \lg r\rho - \alpha \lg \frac{\rho}{r}. \qquad (8.37)$$

Коэффициент пьезопроводности второй зоны рекомендуется принимать пропорционально соотношению водопроводимостей двух зон.

При наличии границы раздела в напорно-безнапорных условиях коэффициент пьезопроводности безнапорной зоны должен определяться по данным откачек непосредственно в этой зоне.

В рыхлых отложениях он может быть рассчитан по известным значениям водопроводимости и водоотдачи.

Предложенный метод целесообразно применять при соотношении водопроводимостей двух зон порядка 10—15 или меньше, при бо́льших соотношениях проницаемость второй зоны может существенно проявляться лишь при значительных временах опытов. В этих случаях за практикуемое время опытов (не более 2—3 месяцев) граница неоднородности работает как непроницаемая, что надо учитывать при определении параметров.

### Круговая граница раздела

Данная схема обычно имеет место в трещиноватых и закарстованных пластах, когда опытный участок или участок водозабора расположены в зоне повышенной водопроводимости, окруженной породами с более низкой проницаемостью. Часто центральная зона имеет замкнутую форму близкую к круговой.

В процессе непродолжительных откачек влияние более удаленных участков водоносного горизонта не проявляется и определяются параметры центральной зоны. Однако их использование в прогнозных расчетах при игнорировании уменьшения водопроводимости в периферийной части воронки депрессии может привести к существенным ошибкам, в частности к завышению эксплуатационных запасов подземных вод [14, 52].

Определение параметров периферийной области депрессии может быть также выполнено по данным кустовых откачек непосредственно в этой зоне. При этом должно быть проведено несколько таких откачек.

В то же время в ряде случаев осредненные параметры удаленной зоны могут быть определены графоаналитическим способом по временным графикам, по данным длительных опытно-эксплуатационных откачек или эксплуатации водозаборов.

Если водозаборная или опытная скважина расположена в центре зоны радиуса $r_1$ с коэффициентом водопроводимости $(km)_1$ и пьезопроводности $a_1$, а весь остальной пласт имеет коэффициент водопроводимости $(km)_2$ и пьезопроводности $a_2$, то понижение уровня по истечении некоторого времени во внутренней области может быть рассчитано по формуле Г. Б. Пыхачева [99]:

$$S = \frac{Q}{2\pi}\left[\frac{1}{(km)_1}\ln\frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{(km)_2}\ln\frac{R_2}{r_1}\right], \qquad (8.38)$$

где $r_0$ — радиус скважины;

$R_2 = 1{,}5\sqrt{a_2 t}$ — приведенный радиус внешней зоны.

Возможность применения формулы (8.38) в рассматриваемых условиях показана В. Н. Щелкачевым [144].

Критерий возможности ее использования для скважин, расположенных во внутренней зоне пласта, определяется из условия:

$$t \geqslant \frac{r_1^2}{0{,}4a_2}. \qquad (8.39)$$

Таким образом, при расчете по формуле (8.38) пренебрегают емкостными свойствами внутренней зоны. Структура этой формулы свидетельствует о том, что она может быть приведена к виду прямой $S = A + C \lg t$. Графики в координатах $S - \lg t$ при условии (8.39) должны быть прямолинейны.

$$C = \frac{0{,}183Q}{(km)_2}; \qquad (8.40)$$

$$A = \frac{0{,}366Q}{(km)_1}\lg\frac{r_1}{r^*} + C\lg\frac{2{,}25a_2}{r_1^2}, \qquad (8.41)$$

где $r^*$ — приведенное расстояние от опытной до наблюдательной скважины, учитывающее положение опытной скважины относительно центра зоны.

Выражения для расчета $r^*$ приводятся в работе Ф. М. Бочевера [29]: $r^* = \psi r$, где $r$ — расстояние между опытной и наблюдательной

скважинами; $\psi$ — коэффициент, зависящий от смещений опытной и наблюдательной скважины относительно центра зоны. Практически для расчетов можно принимать $\psi = 1{,}5$ при удалении опытной скважины от центра внутренней зоны не более, чем на $0{,}5r_1$.

Из условий (8.40) и (8.41) находятся параметры $(km)_2$ и $a_2$:

$$(km)_2 = \frac{0{,}183Q}{C}; \tag{8.42}$$

$$\lg a_2 = 2\lg r_1 + \frac{A}{C} - \frac{0{,}366Q}{C\,(km)_1}\lg\frac{r_1}{r^*} - 0{,}35. \tag{8.43}$$

Параметры $(km)_1$ и $a_1$ определяются по относительно кратковременным кустовым откачкам во внутренней зоне, когда влияние внешней границы несущественно.

При известном $a_1$ величина $a_2$ может приниматься также пропорционально соотношению коэффициентов водопроводимости двух зон.

Критерий для определения времени, когда влияние откачки достигает границы внутренней зоны, получен В. Д. Бабушкиным [2]:

$$t = \frac{r_1^2}{2a_1}\eta(\gamma);\ \gamma = \frac{r_0}{r_1}, \tag{8.44}$$

где $\eta(\gamma)$ — специальная функция, табулированная в работе [2]. Для удобства пользования приведем значения $\eta(\gamma)$ (табл. 24).

Таблица 24

| № п. п. | $\gamma$ | $\eta(\gamma)$ | № п. п. | $\gamma$ | $\eta(\gamma)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0,0000 | 15 | 0,06 | 0,4881 |
| 2 | 0,95 | 0,0022 | 16 | 0,05 | 0,4913 |
| 3 | 0,90 | 0,0096 | 17 | 0,04 | 0,4941 |
| 4 | 0,80 | 0,0372 | 18 | 0,03 | 0,4964 |
| 5 | 0,70 | 0,0802 | 19 | 0,02 | 0,4982 |
| 6 | 0,60 | 0,1360 | 20 | 0,01 | 0,4995 |
| 7 | 0,50 | 0,2017 | | | |
| 8 | 0,40 | 0,2734 | 21 | $5\cdot10^{-3}$ | 0 4999 |
| 9 | 0,30 | 0,3466 | | | |
| 10 | 0,20 | 0,4156 | 22 | $10^{-3}$ | 0.5000 |
| 11 | 0,10 | 0,4720 | | | |
| 12 | 0,09 | 0,4765 | 23 | $10^{-4}$ | 0 5000 |
| 13 | 0,08 | 0,4806 | 24 | $10^{-5}$ | 0,5000 |
| 14 | 0,07 | 0,4845 | | | |

## 3. УЧАСТКИ ВБЛИЗИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ОЧАГОВ РАЗГРУЗКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Изложенные в предыдущих главах методы расчета параметров и обработки результатов опытных работ в общем случае справедливы для условий, описываемых уравнением Тейса — Джейкоба. При этом предполагается, что весь расход, отбираемый в процессе откачки,

формируется за счет упругих или емкостных свойств пласта. Практически в процессе проведения откачек нередки случаи, когда часть дебита обеспечивается за счет дополнительных источников питания, не вызывающих снижения уровня во времени ($Q_{доп}$).

Такие условия наблюдаются при откачках вблизи очагов разгрузки (родники, участки площадного высачивания, участки разгрузки путем испарения, ограниченная разгрузка в русла рек, частичная фильтрация из реки и пр.), и особенно характерны для условий работы действующих водозаборов [12]. Таким образом, снижение уровня во времени связано только с частью общего расхода скважины или суммарного расхода группы скважин при откачке.

Несомненно, эти факторы должны учитываться при анализе опытных откачек. При этом возникает проблема определения не только основных расчетных параметров, но и величины дополнительного питания. Последняя может быть ограниченной и через некоторое время уже не изменяться во времени, либо постепенно возрастать в процессе опыта, достигая в пределе величины водоотбора. В последнем случае режим движения стабилизируется.

Понижение уровня в условиях дополнительного питания может быть выражено в следующем общем виде:

$$S = \frac{0{,}183\,[Q - Q_{доп}(t)]}{km} \lg \frac{2{,}25at}{r^2} + \frac{0{,}366 Q_{доп}(t)}{km} \lg \frac{R^*}{r}, \qquad (8.45)$$

где $R^*$ — некоторый условный радиус питания, зависящий от размеров и конфигурации очага разгрузки и положения относительно него опытной и наблюдательных скважин.

При обработке результатов опытных откачек способом Джейкоба стандартный характер площадных, временных и комбинированных графиков может в связи с наличием дополнительного питания существенно искажаться.

В наибольшей степени дополнительное питание будет отражаться на форме временных и комбинированных графиков. При этом возможны следующие основные варианты.

1. Прямолинейность графика $S$—$\lg t$ нарушается, наблюдается постепенное выполаживание, связанное с возрастанием дополнительного питания в процессе опыта, в пределе график становится параллельным оси абсцисс.

2. Прямолинейная форма графика сохраняется, но уменьшается его угловой коэффициент $C$, причем уклон графика становится тем меньше, чем больше доля дополнительного питания в общем расходе скважины. Такая деформация графиков наблюдается тогда, когда со временем величина $Q_{доп}$ становится постоянной, или ее рост пренебрежимо мал по сравнению с общим расходом при откачке.

Второй случай представляет существенный интерес для определения дополнительного питания по данным опытных откачек. Если $Q_{доп} \approx \text{const}$, то выражение (8.45) принимает вид:

$$S = \frac{0{,}183\,(Q - Q_{доп})}{km} \lg \frac{2{,}25at}{r^2} + \frac{0{,}366 Q_{доп}}{km} \lg \frac{R^*}{r}. \qquad (8.46)$$

Как и при отсутствии дополнительного питания, уравнение (8.46) может быть преобразовано в уравнение прямой относительно $\lg t$ или $\lg r$:

$$S = A(t) + C_t \lg t; \tag{8.47}$$

$$S = A_r - C_r \lg r. \tag{8.48}$$

В уравнении (8.47):

$$C_t = \frac{0{,}183\,(Q - Q_{\text{доп}})}{km}; \tag{8.49}$$

$$A_t = \frac{0{,}183\,(Q - Q_{\text{доп}})}{km} \lg \frac{2{,}25a}{r^2} + \frac{0{,}366 Q_{\text{доп}}}{km} \lg \frac{R^*}{r}. \tag{8.50}$$

Отсюда:

$$km = \frac{0{,}183\,(Q - Q_{\text{доп}})}{C_t}; \tag{8.51}$$

$$\lg a = \frac{A_t}{C_t} - 0{,}35 + 2\lg r - \frac{0{,}366 Q_{\text{доп}}}{km C_t} \lg \frac{R^*}{r}. \tag{8.52}$$

Как видно, при неизвестном $Q_{\text{доп}}$ параметры пласта $km$ и $a$ непосредственно не определяются.

В уравнении (8.48):

$$C_r = \frac{0{,}366 Q}{km}; \tag{8.53}$$

$$A_r = \frac{0{,}183\,(Q - Q_{\text{доп}})}{km} \lg 2{,}25at + \frac{0{,}183 Q_{\text{доп}}}{km} \lg R^*. \tag{8.54}$$

Отсюда:

$$km = \frac{0{,}366 Q}{C_r}; \tag{8.55}$$

$$\lg a = \frac{A_r km}{0{,}183\,(Q - Q_{\text{доп}}) + 2 Q_{\text{доп}} \lg R^*} - 0{,}35 - \lg t. \tag{8.56}$$

Сопоставляя (8.51) и (8.55), видим, что в отличие от временно́го уклон площадного графика практически не зависит от величины дополнительного питания и определяется суммарным расходом при откачке.

При этом следует иметь в виду, что разброс точек на площадном графике может существенно возрастать из-за того, что в строгой постановке при построении графика $S$—$\lg r$ должно приниматься не фактическое расстояние между опытной и наблюдательной скважиной, а приведенное, так как выражение (8.46) не учитывает фиктивную замену дополнительного питания некоторой нагнетательной системой. Разброс точек тем больше, чем сложнее расположение очагов разгрузки.

Следовательно, водопроводимость может быть опре́делена непосредственно по суммарному расходу. Коэффициенты пьезопроводности определить невозможно, так как в выражении (8.56) не известны величины $R^*$ и $Q_{\text{доп}}$.

Приближенно с некоторым завышением коэффициент пьезопроводности может быть определен, если пренебречь расположением и конфигурацией очага дополнительного питания, т. е. принять

$$R^* = 1{,}5\sqrt{at}. \tag{8.57}$$

Фактически всегда $R^* < 1{,}5\sqrt{at}$, поскольку дополнительное питание формируется в пределах депрессионной воронки. Тогда:

$$A_r = \frac{0{,}183Q}{km} \lg 2{,}25at; \tag{8.58}$$

$$\lg a = \frac{2A_r}{C} - 0{,}35 - \lg t. \tag{8.59}$$

Выражение (8.59) совпадает с соответствующим выражением для условий неограниченного пласта.

Определение коэффициента пьезопроводности по временны́м графикам при условии (8.57) невозможно, так как тогда приходится принять, что уклон графика не зависит от величины $Q_{доп}$. Таким образом, при относительно постоянной величине $Q_{доп}$ в процессе откачки при условии неустановившегося режима ($Q_{доп} < Q$), дополнительное питание может быть определено тремя способами.

1. По сопоставлению временных и площадных графиков.

Из выражений (8.51) и (8.55) следует, что

$$\frac{C_t}{C_r} = \frac{Q - Q_{доп}}{2Q}; \tag{8.60}$$

$$Q_{доп} = Q\left(1 - 2\frac{C_t}{C_r}\right). \tag{8.61}$$

2. По соотношению величины темпа снижения уровня при существенно разном расходе воды при откачке [12].

Для этого надо иметь на графике $S$—lg $t$ не менее двух участков, соответствующих водоотбору различной интенсивности $Q_1$ и $Q_2$, при этом должно выполняться условие:

$$Q_{доп} < Q_1 < Q_2. \tag{8.62}$$

Если график на первом участке прямолинеен, можно принять, что условие (8.62) выполняется и $Q_{доп} \approx$ const. Тогда

$$\frac{(C_t)_1}{(C_t)_2} = \frac{Q_1 - Q_{доп}}{Q_2 - Q_{доп}}. \tag{8.63}$$

Откуда

$$Q_{доп} = \frac{(C_t)_2 Q_1 - (C_t)_1 Q_2}{(C_t)_2 - (C_t)_1}, \tag{8.64}$$

$(C_t)_1$ и $(C_t)_2$ — угловые коэффициенты графика $S$—lg $t$ при $Q_1$ и $Q_2$.

После определения $Q_{доп}$ из выражения (8.51) определяется коэффициент водопроводимости.

Возможны варианты, например, при ограниченной фильтрации из рек ввиду слабой пропускной способности аллювия, когда дополнительное питание увеличивается практически пропорционально росту дебита откачки. Тогда уклоны временны́х графиков на разных ступенях откачки практически одинаковы и $Q_{доп}$ не может быть определено предложенным способом.

3. По соотношению темпа снижения уровня при кратковременных и длительных откачках с разным водоотбором.

При непродолжительных опытах в первоначальный период дополнительное питание практически еще не проявляется и начинает привлекаться к опробуемой скважине лишь через более или менее продолжительное время с развитием депрессии по площади и на глубину.

Тогда на первом этапе темп снижения уровня определяется суммарным расходом $Q_1$, а на втором — разностью расходов ($Q_2$ — $— Q_{доп}$).

$$\frac{(C_t)_1}{(C_t)_2} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_{доп}}; \tag{8.65}$$

$$Q_{доп} = \frac{(C_t)_1 Q_2 - (C_t)_2 Q_1}{(C_t)_1}. \tag{8.66}$$

Критерием непроявления дополнительного питания при первом периоде откачки может служить совпадение $km$, рассчитанных по площадным и временны́м графикам.

Второй и третий способы определения дополнительного питания по своему содержанию и физическому смыслу идентичны.

В ряде случаев наличие дополнительного питания может наблюдаться непосредственно, когда в процессе откачки фиксируется исчезновение или существенное уменьшение расхода родников, поглощение или полное исчезновение поверхностного стока небольших ручьев и пр. Иногда о наличии дополиительного питания можно заключить лишь по косвенным признакам, в частности по анализу полулогарифмических графиков изменения понижения уровня во времени и по площади.

При анализе графиков изменения понижения уровня о наличии дополнительного питания в процессе откачки свидетельствуют следующие признаки.

1. Расхождение коэффициентов водопроводимости, рассчитанных по временны́м и площадным графикам для условий неограниченного пласта, если последние оказываются меньше.

2. Зависимость рассчитанных значений коэффициентов водопроводимости от величины дебита, при этом уклоны временны́х графиков увеличиваются в большей степени, чем растет дебит (согласно условию 8.63).

3. Расхождение коэффициентов водопроводимости, рассчитанных по кратковременным и более длительным откачкам в сторону возрастания последних.

Если при скачкообразном возрастании дебита значения $km$, рассчитанные по временным графикам, остаются постоянными, но превышающими значения, рассчитанные по площадным графикам, это свидетельствует об увеличении дополнительного питания пропорционально росту водоотбора. Если параметры, рассчитанные по временным графикам, уменьшаются, то дополнительное питание ограниченно.

Предложенная методика расчета дополнительного питания и определения параметров с учетом такого питания может быть использована только тогда, когда временные графики прямолинейны, т. е. изменение величины привлекаемого питания за время соответствующей ступени опыта несущественно.

При длительных откачках из замкнутых или полосообразных пластов, когда наблюдается линейная или коренная зависимость между понижением и временем, для расчета дополнительного питания могут быть использованы угловые коэффициенты графиков при разной величине дебита, построенных в соответствующих координатах. Определение дополнительного питания в замкнутом круговом пласте по данным эксплуатации Жанайского водозабора рассмотрено в работе [12].

Практически лучшие результаты при определении дополнительного питания могут быть достигнуты, когда достаточно мощная откачка проводится вблизи локализованного очага разгрузки и в течение относительно непродолжительного времени разгрузка может быть полностью прекращена. При рассредоточенной разгрузке за время откачки, как правило, не удается достичь ее полного перехвата. Это достигается лишь в процессе эксплуатации водозаборов.

Рассмотрим ряд конкретных примеров, иллюстрирующих проявление дополнительного питания при откачках, возможности его определения и расчета параметров с учетом этого питания.

Южно-Сосьвинский участок (по данным В. К. Воронина) расположен на восточном склоне Урала в районе сочленения древних складчатых структур с мезокайнозойским чехлом Западно-Сибирской плиты. Групповой откачкой из трех скважин IVр, Vр, VIр опробован водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватым опокам эоцена. Горизонт напорный, в его кровле залегают относительно водоупорные диатомовые глины, высота напора порядка 30—35 м. Водоносный горизонт получает питание на западе и юге в области выхода водовмещающих пород на поверхность. Разгрузка подземных вод, судя по карте гидроизогипс, осуществляется в центральной части участка восходящей фильтрацией в долину р. Сосьва и ее притоков. Схема расположения опытных и наблюдательных скважин, а также разрез через центральную часть участка приведены на рис. 61.

Продолжительность групповой откачки 47 суток, суммарный дебит 248 л/сек. Откачка проходила при четко выраженном неустановившемся режиме. В процессе откачки развилась большая депрес-

сионная воронка, захватившая всю центральную часть участка, радиус ее достигал 4—5 км. Предварительно скважина IVр была опробована кратковременной кустовой откачкой с расходом 63 л/сек продолжительностью 13 суток.

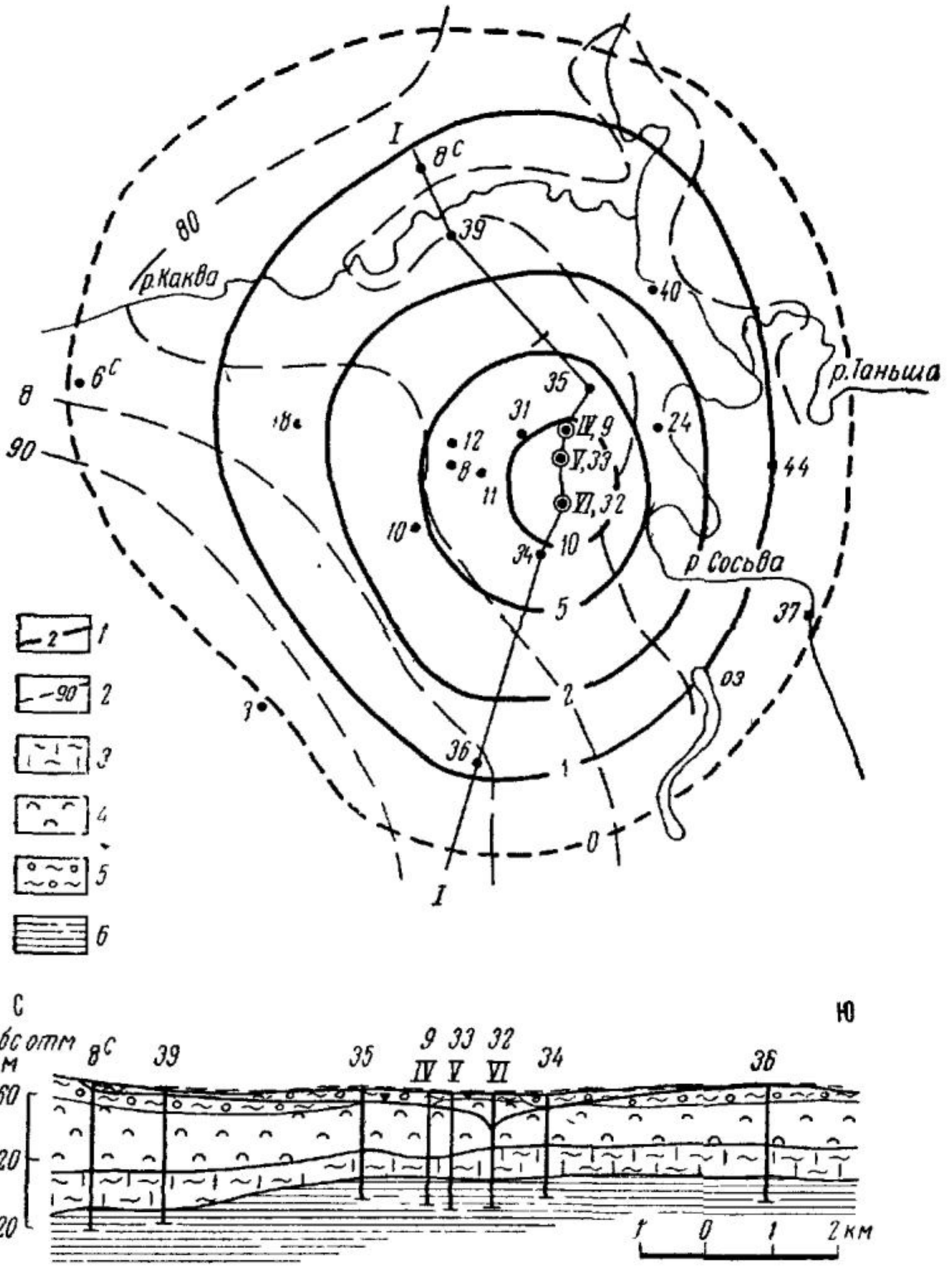



**Рис. 61. Схема опробования и разрез по *I—I* в районе куста групповой откачки из скважин IV, V, VI (по данным В. К. Воронина, 1968 г., Зауралье).**

*1* — изолинии понижения; *2* — пьезоизогипсы; *3* — опоки; *4* — диатомиты и глины; *5* — галечники с глинистым заполнителем; *6* — глины

Графики $S$—lg $t$ по наблюдательным скважинам при обеих откачках имеют очевидную прямолинейную форму без тенденции к выполаживанию (рис. 62, *а*, *б*). График $S$—lg $r$ на конец групповой откачки, несмотря на некоторое рассеяние точек, может быть аппроксимирован прямой линией (рис. 62, *в*).

Результаты расчета параметров по зависимостям неограниченного пласта сведены в табл. 25.

Полученные данные свидетельствуют о наличии дополнительного питания в процессе групповой откачки за счет сокращения восходящей разгрузки в р. Сосьва. Параметры, рассчитанные по площадному и по временно́му графикам при кратковременной откачке, одинаковы и значительно меньше определенных по временны́м графикам при групповой откачке. По данным, приведенным в табл. 25, рассчитано дополнительное питание: по формуле (8.66) $Q_{доп}$ = = 78 л/сек; по формуле (8.61) $Q_{доп}$ = 75,5 л/сек. Расчеты обоими способами дали одинаковый результат.

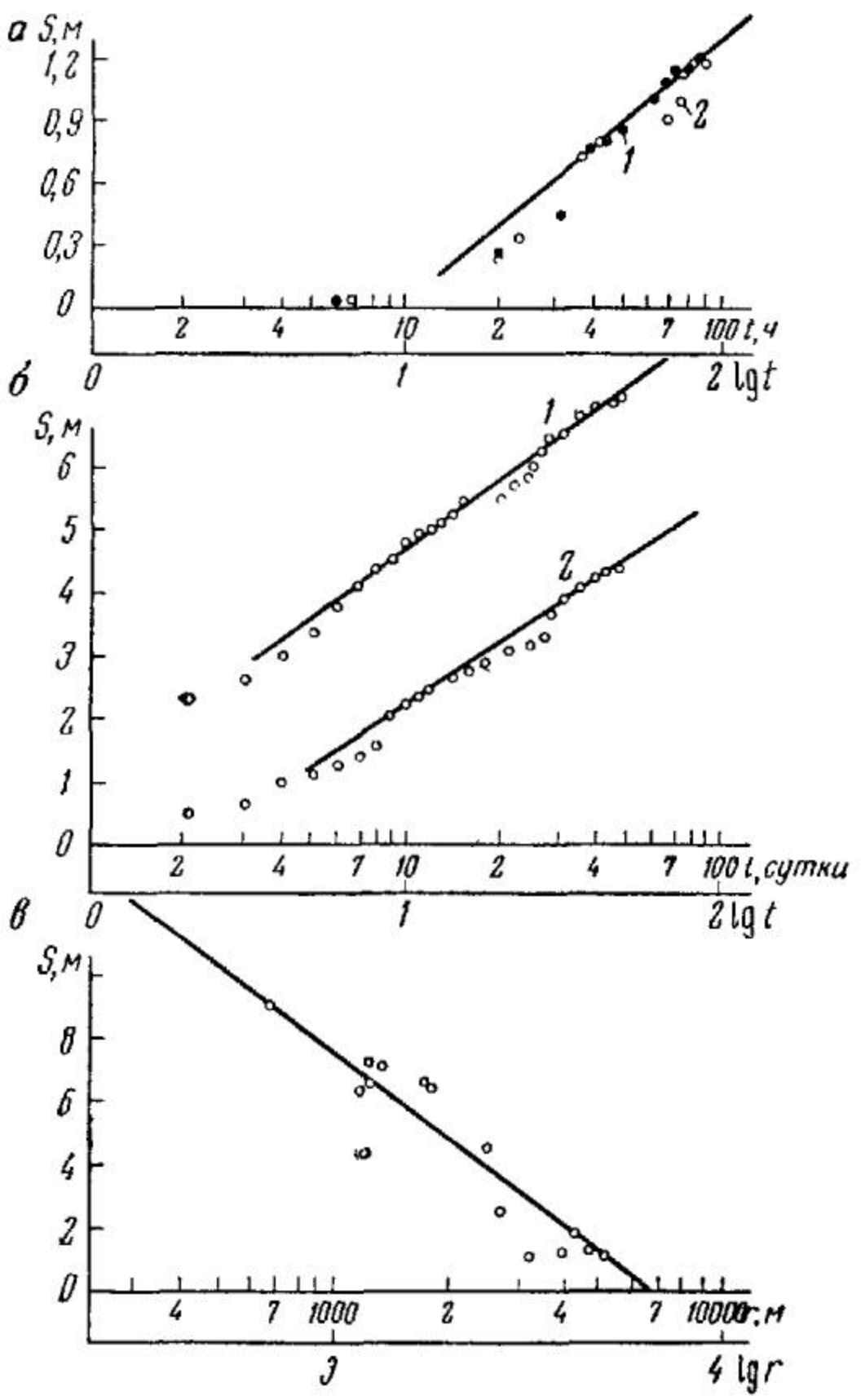



Рис. 62. Графики прослеживания при групповой откачке (условия см. на рис. 61).

*а* — графики временного прослеживания по наблюдательным скважинам: *1*—*V* и *2* — 31 при откачке из скважины IV с дебитом 63 л/сек; *б* — графики временного прослеживания по наблюдательным скважинам: *1* — 34 и *2*—24 при откачке из скважин IV, V, VI, *в* — график площадного прослеживания при откачке из скважин IV, V, VI с $Q$ = 248 л/сек

Пренебрежение наличием дополнительного питания в рассмотренном примере приводит к завышению в 1,5 раза коэффициента водопроводимости, рассчитанного по данным групповой откачки по временны́м графикам.

Участок Поперечный (по данным В. К. Воронина) характерен тем, что возможность определения величины дополнительного питания по анализу соотношения уклонов графиков изменения уровня во времени при разном водоотборе подтверждается прямыми измерениями величины привлекаемого питания.

На участке Поперечный опытно-эксплуатационной откачкой из скважины Iр опробованы трещиноватые палеозойские серпентиниты. Откачка проведена при трех ступенях расхода. Вблизи опробованной скважины на участке протекает ручей, берущий начало из родника и дренирующий подземные воды. В процессе II и III сту-

Таблица 25

| Способ обработки | № опытных скважин | Дебит, л/сек | Угловой коэффициент графика $C$ | Коэффициент водопроводимости $km$, м²/сутки | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| $S-\lg t$ | IVp | 63 | 1,2 | 820 | Среднее по 11 скважинам |
| $S-\lg t$ | IVp, Vp, VIp | 248 | 3,24 | 1210 | |
| $S-\lg r$ | IVp, Vp, VIp | 248 | 9,3 | 840 | |

пеней откачки наблюдалось линейное снижение уровня во времени, что соответствует условиям замкнутого пласта. При откачке поверхностный сток в ручье практически прекращался.

В процессе II и III ступеней откачки дебит скважины составлял 40 и 79,6 л/сек при угловых коэффициентах графиков $S-t$, соответственно $2{,}1\cdot10^{-2}$ и $5\cdot20^{-2}$ м/сутки. Дополнительное питание, рассчитанное с учетом этих данных по формуле (8.64), 13 л/сек. По данным непосредственных замеров расход ручья перед началом откачки составлял 15 л/сек. Таким образом, правильность результатов расчета величины разгрузки подтверждается данными прямых замеров.

Бердичевский участок (по данным Ж. П. Ждановой) расположен в пределах Украинского кристаллического щита вблизи г. Бердичева. Опытно-эксплуатационной откачкой из опытного куста 981, 999 (рис. 63, *а*) опробованы трещиноватые граниты и мигматиты докембрийского возраста. Трещиноватость водовмещающих пород весьма неравномерна. Точки для заложения опытных скважин были выявлены по данным геофизических работ в пределах зоны тектонического нарушения. Опытный куст расположен в замкнутом понижении, где осуществляется восходящая неявно выраженная разгрузка подземных вод. Условия разгрузки иллюстрируются геолого-гидрогеологическим разрезом (рис. 63, *б*).

В данных условиях единственным способом определения разгрузки является анализ данных опытно-эксплуатационной откачки. Опытно-эксплуатационная откачка из скважин 981 и 999 проведена с разновременным пуском опытных скважин. Наблюдательные скважины были оборудованы на трещиноватые граниты и на отложения коры выветривания, представленные глиной с дресвой и щебнем материнских пород. Кроме того, велись наблюдения по широкой сети колодцев, оборудованных на четвертичные пески. Реакция на откачку наблюдательной скважины 1001, оборудованной на кору выветривания, и колодцев подтвердила проницаемость глинистых отложений коры выветривания и, следовательно, наличие разгрузки подземных вод на данном участке при имевшем место положении уровня подземных вод до начала откачки.

В первый период откачки в течение 14 суток работала одна скважина 999 с расходом 1334 м³/сутки. График $S$—lg $t$ по наблюдательным

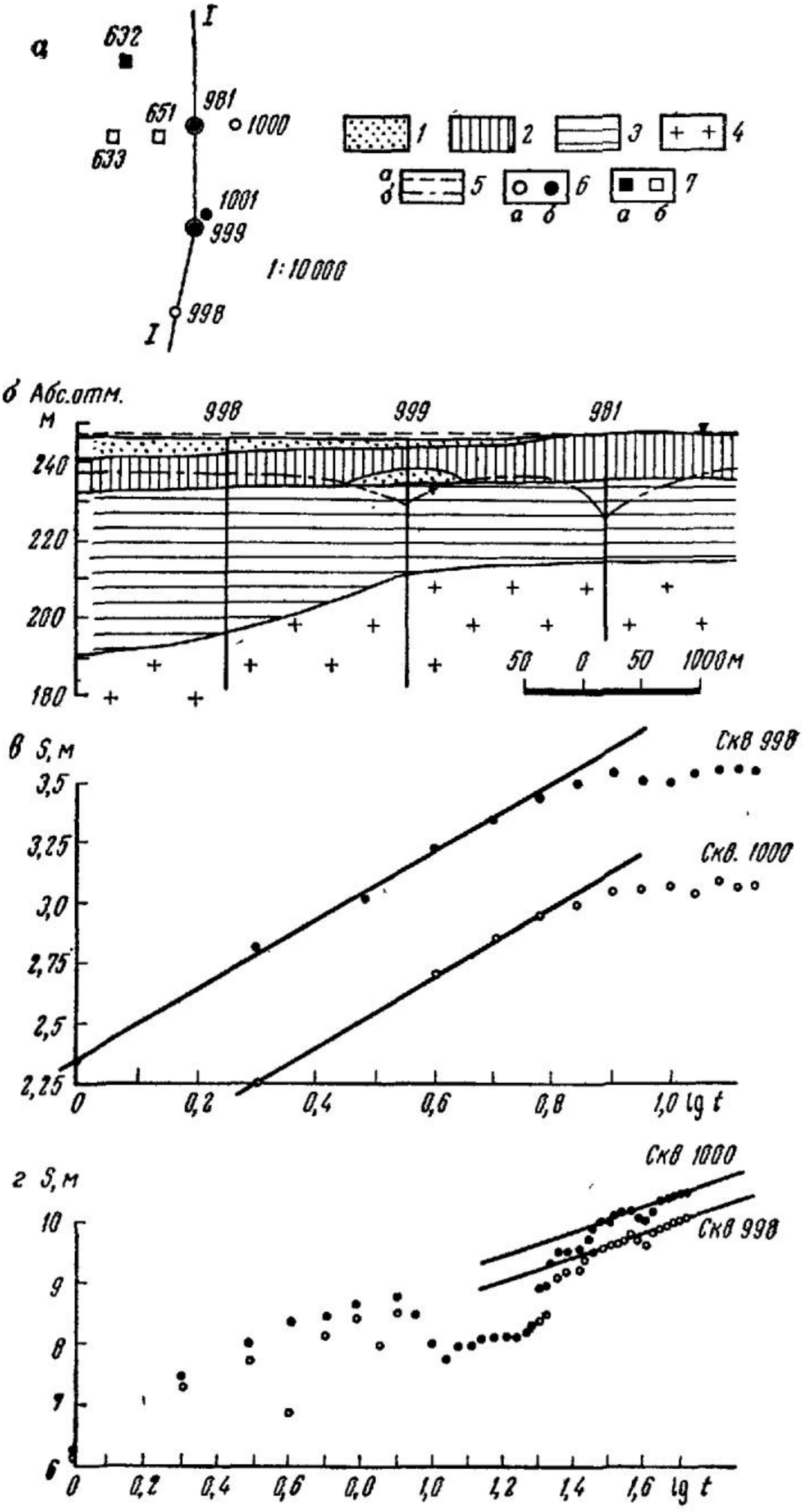



**Рис. 63. Групповая опытно-эксплуатационная откачка из куста 981, 999.**

*а* — схема опробования; *б* — разрез по *I—I*; *в* — графики временного прослеживания при откачке из скв. 999; *г* — графики временного прослеживания при откачке из скважин 981, 999. *1* — песок; *2* — лёссовидный суглинок; *3* — глины коры выветривания; *4* — трещиноватые граниты; *5* — статический (*а*) и динамический (*б*) уровни; *6* — наблюдательные скважины на трещиноватые граниты (*а*) и на отложения коры выветривания (*б*); *7* — колодцы, осушенные при откачке (*а*) и действующие (*б*) (по данным Ж. П. Ждановой, 1970 г., Украинский кристаллический щит)

скважинам 998 и 1000 представлен на рис. 63, *в*. Как видно на графике, в конце периода откачки наступила стабилизация, уровни в колодцах не понижались, т. е. весь водоотбор был обеспечен в это время естественной разгрузкой. Начальные участки графиков $S$—lg $t$ имеют прямолинейную форму. На этом этапе сокращения естественной разгрузки еще не отмечалось. Затем по мере развития депрессии по площади и на глубину графики $S$—lg $t$ начали выполаживаться, что свидетельствует о постепенном возрастании доли обеспеченного питания в общем расходе скважины.

Начальные прямолинейные участки графиков $S$—lg $t$ позволяют определить коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности пласта в опробуемой зоне без учета дополнительного питания. Расчет по скважине 998:

$$km = \frac{0{,}183 \cdot 1334}{1{,}49} = 164 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

$$\lg a = 2 \lg 150 - 0{,}35 + \frac{2{,}35}{1{,}49} = 5{,}57, \quad a = 3{,}7 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сутки}.$$

После включения скважины 999 суммарный дебит составил 4864 м³/сутки. В конце откачки наблюдался неустановившийся режим фильтрации, графики $S$—lg $t$ по наблюдательным скважинам имеют прямолинейный характер (рис. 63, *г*). Часть колодцев, каптирующих четвертичные пески, была полностью осушена, а в других — уровень постоянно понижался. Характер графиков $S$—lg $t$ в конце откачки свидетельствует о том, что рост доли обеспеченного питания в общем водоотборе прекратился.

Значение коэффициента водопроводимости, определенное по конечным участкам графиков $S$—lg $t$ без учета дополнительного питания, составляет 390 м²/сутки, т. е. почти в 2,5 раза превышает его действительное значение. Следовательно, величина питания за счет сокращения естественной разгрузки на втором этапе откачки существенно возросла. Отметим, что при построении графиков $S$—lg $t$ по второму этапу откачки время отсчитывалось от пуска скважины 999, так как ее пуску предшествовала стабилизация уровней.

Анализ результатов откачки позволяет рассчитать величину дополнительного питания за счет сокращения естественной разгрузки по формуле (8.66), поскольку на величину $C_1$ оно не влияет.

$$Q_{доп} = \frac{1{,}49 \cdot 4864 - 2{,}2 \cdot 1334}{1{,}49} = 2900 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Дополнительное питание, рассчитанное по графику $S$—lg $t_{пр}$ без учета периода стабилизации, составило 2760 м³/сутки.

Таким образом, в данных гидрогеологических условиях величина неявно выраженной разгрузки подземных вод на опытном участке не могла быть определена другими способами. Единственным достаточно надежным способом определения локализованной неявно выраженной разгрузки является анализ опытных закономерностей

изменения уровня при опытно-эксплуатационной откачке, проведенной при двух ступенях расхода.

Беркутинский участок (по данным И. Е. Прынева) расположен в долине рч. Беркуты в Малом Каратау. Водовмещающими породами являются трещиноватые и закарстованные карбонатные породы тамдинской серии кембрия — ордовика, к которым приурочен безнапорный водоносный горизонт. Разгрузка подземных вод в пределах участка осуществляется непосредственно в русло реки и частично родниковым стоком. Гидрогеологическая схема участка ясна из рис. 64. Среднегодовой расход реки равен 315 л/сек. Во время проведения опытных работ он изменялся в пределах 370—130 л/сек, а суммарный расход родников составлял около 50 л/сек.

На участке была проведена длительная (7 месяцев) групповая откачка из трех скважин (400, 426, 428) со ступенчатым изменением расхода. В процессе откачки с расходом более 200 л/сек сток в реке прекращался, а родники срабатывались частично или полностью.

Весь период откачки в связи с разновременностью включения и отключения отдельных скважин, а также нестабильностью работы насосов разбит на несколько расчетных периодов, в течение которых расход системы был относительно стабилен. Расход реки в отдельные периоды также менялся. Менялась и доля обеспеченного питания в общей величине расхода. В таких условиях, как показано выше, должно наблюдаться уменьшение коэффициентов водопроводимости, рассчитанных без учета дополнительного питания, при возрастании дебита откачки. Действительно, расчеты показывают заметную обратно пропорциональную зависимость коэффициентов водопроводимости от величины возмущения. Эта зависимость иллюстрируется графиком на рис. 65, *а*. Величины $km$ (например, по скважине 408), рассчитанные по временным графикам, изменяются от 2620 до 644 м²/сутки при возрастании расхода от 37,4 до 170 л/сек. Соотношение полученных на разные периоды значений $km$ и соответствующих им расходов показывает, что при росте водоотбора увеличилось дополнительное питание, оставаясь относительно стабильным в отдельные периоды.

Однако оно увеличивалось существенно медленнее по сравнению с ростом водоотбора. Проведенные расчеты показывают, что в процессе второго, третьего и четвертого периодов откачки при расходе соответственно 75, 93 и 170 л/сек дополнительное питание было порядка 50—70 л/сек. Поэтому действительное значение коэффициентов водопроводимости, рассчитанное по формуле (8.51), 310—350 м²/сутки.

Определение параметров без учета дополнительного питания помимо их нестабильности от величины возмущения приводит также к нестабильности полученных значений в зависимости от режима реки.

Сравним две группы коэффициентов водопроводимости, определенных по временным графикам по одним и тем же наблюдательным

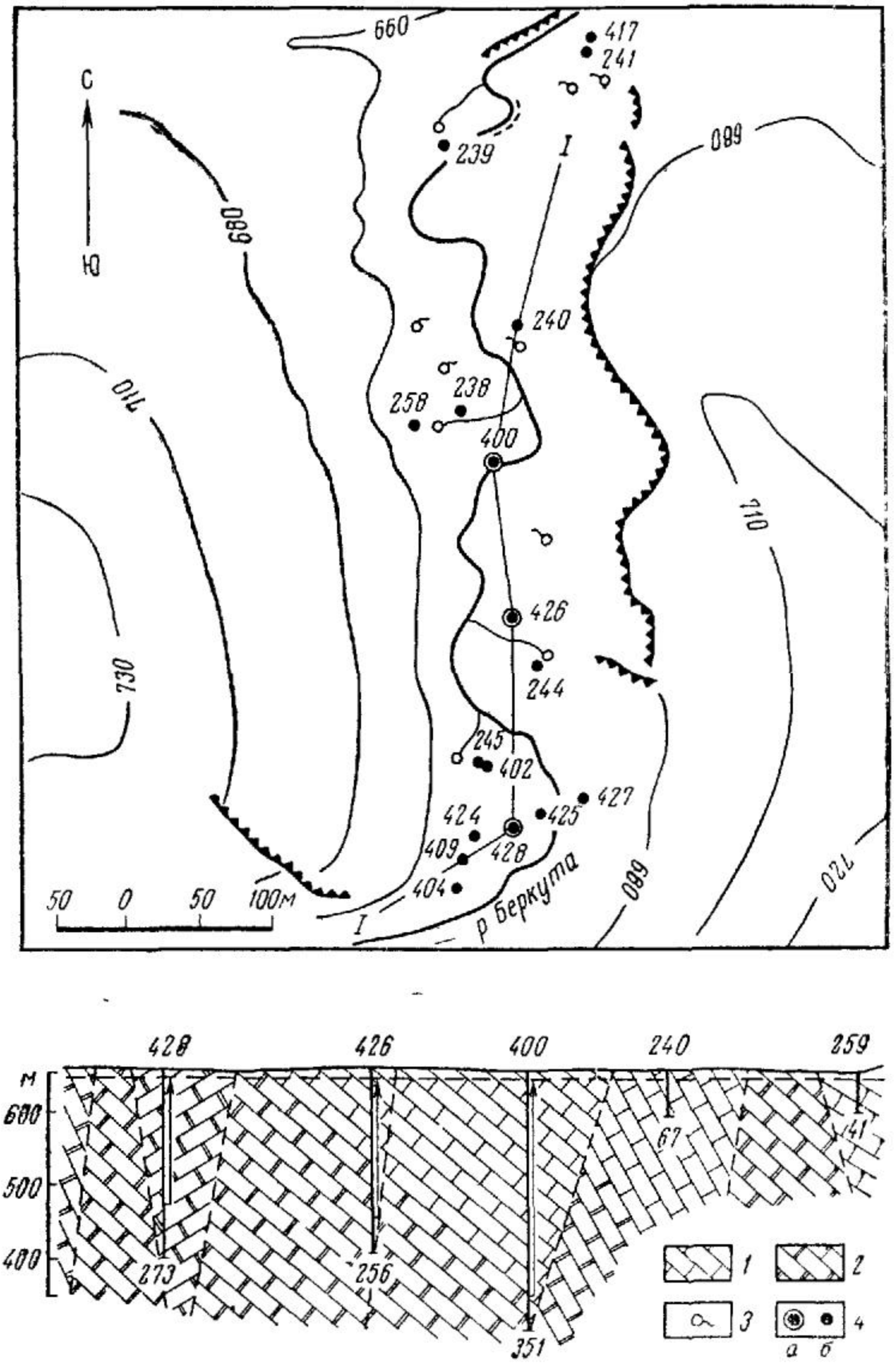



Рис. 64. Схема опробования и разрез по *I—I* участка вблизи очага разгрузки и малой реки (по данным И. Е. Прынева, 1967 г., Каратау).

— известняки; *2* — доломиты, *3* — родники; *4* — возмущающие (*а*) и наблюдательные (*б*) скважины

скважинам при откачках из скважин 400, 426 с расходом 148 л/сек в ноябре, когда среднемесячный расход реки составлял 130 л/сек, и из скважин 400, 428 с расходом 237 л/сек в феврале, когда расход реки был равен 370 л/сек. На графике рис. 65, *б* видно, что февральские определения систематически выше ноябрьских, хотя при бо́льшей величине возмущения они должны были быть меньше. Следовательно, при увеличении расхода реки величина дополнительного питания существенно возрастает, что затушевывает обратно пропорциональную зависимость от величины расхода откачки рассчитанных значений водопроводимости.

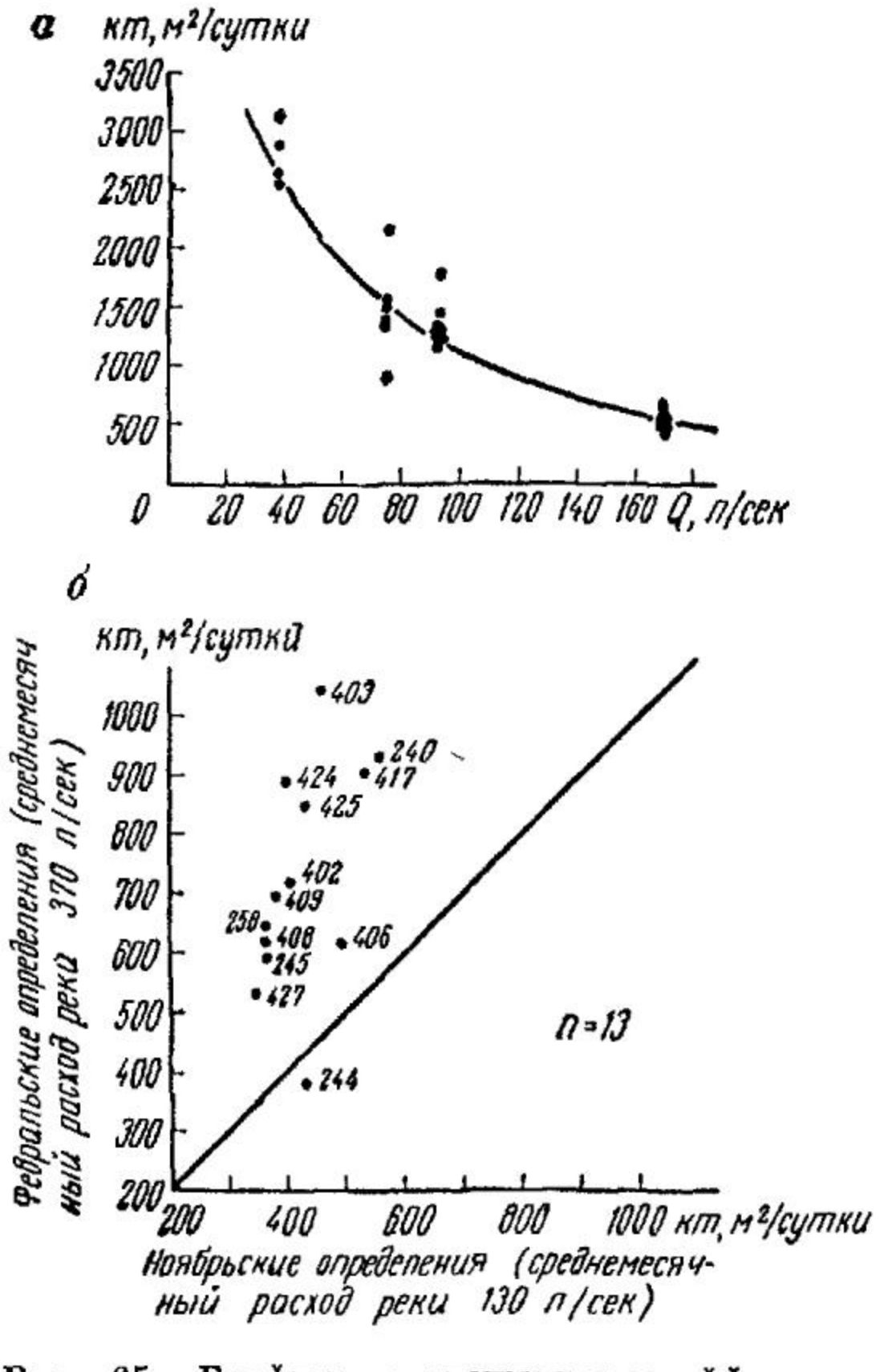



Рис. 65. Графики зависимости коэффициентов водопроводимости, рассчитанных по временному прослеживанию понижения, от степени возмущения (*а*) и режима реки (*б*) (условия см. на рис. 64)

Таким образом, данный пример показывает, что определение действительных параметров пласта при неизвестной величине дополнительного питания по временны́м графикам становится неопределенным.

Площадные графики в данных условиях обнаруживают нарушение функциональной зависимости понижения от расстояния, что связано как с плановой неоднородностью пласта, так и со сложностью граничных условий, так как наблюдательные скважины расположены среди источников и на различных расстояниях от реки.

Поэтому данные проведенной откачки могут быть использованы лишь при прогнозном расчете понижения при расходе близком к опытному расходу в условиях межени.

Рассмотренные примеры позволяют сделать следующие выводы.

1. При обработке результатов опытных откачек вблизи локализованных очагов разгрузки необходимо учитывать долю обеспеченного питания в общем расходе откачки. В противном случае получаются завышенные значения коэффициентов водопроводимости или заниженные показатели, характеризующие темп снижения

уровня, за счет емкостных свойств пласта при обработке откачек гидравлическим методом.

2. В прогнозных расчетах это приводит к занижению расчетных понижений уровня при увеличении проектного расхода по сравнению с опытным.

3. Определение дополнительного питания и расчет параметров с учетом этого питания могут быть выполнены по данным опытных откачек, проведенных при двух разных ступенях возмущения.

## 4. УЧАСТКИ В ПЛАСТАХ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ РАЗНОРОДНЫХ ГРАНИЦ

В предыдущих разделах данной главы в основном рассматривались участки, границы которых могут быть сведены к относительно простым геометрическим схемам (угол, полоса, круг). Однако часто реальные природные условия оказываются значительно сложнее и не могут быть схематизированы применительно к имеющимся типовым схемам.

В одних случаях конфигурация границ слишком сложна, тип границ разнороден или наблюдается сложная зональная неоднородность, в других — положение и характер имеющихся границ вообще остается неопределенным и не может быть достоверно установлен в результате съемочных или буровых работ. Такие участки особенно характерны для областей развития неравномерно трещиноватых пород. К этому типу относятся рассмотренные выше Щучинский, Бердичевский и Поперечный участки, где вопрос о форме и характере их действующих границ решался в основном по данным опытно-эксплуатационных откачек.

Часто действительные или эффективные параметры вообще практически не могут быть получены. Но даже при условии их получения они не всегда могут быть использованы для прогнозного расчета из-за неопределенности расчетной схемы.

При этом прогнозные расчеты выполняются обычно гидравлическим методом. Данные для таких расчетов могут быть получены в процессе длительных опытно-эксплуатационных откачек путем установления эмпирического закона изменения уровня во времени. Следует иметь в виду, что при наличии ограниченного дополнительного питания прямая экстраполяция расхода, достигнутого при откачке, может привести, как показано ранее, к существенным ошибкам.

Таким образом, при обработке результатов опытно-эксплуатационных откачек в рассматриваемых условиях основными вопросами являются:

1) установление эмпирического закона изменения уровня во времени;

2) установление, насколько полно в достигнутой закономерности изменения уровня отражена реальная природная обстановка;

3) установление возможности использования достигнутой закономерности изменения уровня при условии экстраполяции расхода откачки или изменения системы водоотбора.

Решение перечисленных вопросов позволяет использовать данные опытно-фильтрационных работ для выполнения гидрогеологических прогнозов гидравлическим методом, которые могут быть использованы в графической или аналитической форме.

Вопросы установления закономерности изменения уровня во времени рассматривались в работах [48, 106].

В работе Н. М. Елмановой и Л. С. Язвина [48], посвященной оценке эксплуатационных запасов термальных радоновых вод Белокурихинского месторождения на Алтае, предлагается для выбора эмпирического закона изменения уровня строить графики в координатах $S$—$\lg t$, $S$—$\sqrt{t}$ и $S$—$t$. В качестве расчетной выбирается зависимость, наиболее близкая к прямолинейной. Предложенным зависимостям могут отвечать следующие виды графиков:

$$S = A + C \lg t, \quad S = A + C\sqrt{t}, \quad S = A + Ct.$$

В частном случае может быть либо $A = 0$ — график проходит через начало координат, либо $C = 0$ — стабилизация уровня.

Такой прием вполне справедлив, однако он не учитывает возможности достижения промежуточных закономерностей. В общем случае если график изменения уровня не аппроксимируется прямой в полулогарифмическом масштабе, должна подбираться степенная зависимость вида $S = f(t^C)$ (где $C < 1$).

Следовательно, первый и третий виды графиков являются лишь крайними из серии возможных вариантов, соответствующих условиям неограниченного или замкнутого пласта. Таким образом, при установлении эмпирического закона изменения уровня во времени подбором следует сначала последовательно построить графики $S = f(t)$ в полулогарифмическом, коренном и линейном масштабах, а затем в случае необходимости строить промежуточные степенные закономерности, выбирая показатель степени в зависимости от характера отклонения графика от прямой в координатах $S - \sqrt{t}$. Если график выпуклый вниз, выбирается ряд $1 > C > 0{,}5$, если график выпуклый вверх, $C < 0{,}5$.

Этот способ в принципе позволяет решить поставленную задачу. Его неудобство связано лишь с неопределенностью возможного количества вариантов построения графиков *.

После установления вида зависимости $S = f(t)$, аппроксимирующегося прямой, угловой коэффициент графика может служить своеобразным расчетным гидравлическим параметром.

Наиболее существенной погрешностью в условиях, когда изменение понижения во времени определяется степенной зависимостью,

---

* Вид уравнения может быть также установлен по кривой изменения уровня способом наименьших квадратов.

является стремление привести криволинейные графики $S - \lg t$ к серии прямолинейных отрезков с более пологими первыми и крутыми конечными участками [106]. При прогнозах это приводит к существенному занижению расчетных понижений уровня.

Рассмотренные примеры Бердичевского, Щучинского и Поперечного участков иллюстрируют установление характера их граничных условий на основе установления закономерностей изменения уровня.

Поскольку изложенный способ подбора связан с построением неопределенного количества степенных графиков, вполне естественно стремление найти способ, позволяющий сразу определить показатель степени времени. Для этого в работе [106] предложено использовать построение графиков в координатах $\lg S$—$\lg t$. В этом случае угловой коэффициент графика $C$ является показателем степени времени. В этой же работе приведен ряд конкретных примеров, когда криволинейные полулогарифмические графики становятся прямолинейными в билогарифмическом масштабе.

Такой прием весьма удобен, однако его использование ограничивается следующими соображениями. Структура расчетных формул в замкнутых или частично замкнутых пластах, где наблюдается степенная зависимость понижения от времени, имеет вид:

$$S = S_0 + At^C, \tag{8.67}$$

где $S_0$ — постоянное во времени понижение при работе скважины, определяемое конфигурацией границ и положением относительно этих границ опытной и расчетных наблюдательных скважин. Это хорошо видно из структуры формул (8.9) и (8.19) для полосообразного и замкнутого кругового пласта.

При построении графиков в координатах $\lg S$—$\lg t$ игнорируется величина $S_0$. Действительно, логарифмируя выражение (8.67), имеем:

$$\lg (S - S_0) = \lg A + C \lg t. \tag{8.68}$$

Таким образом, построение билогарифмических графиков следует проводить в координатах $\lg (S—S_0)$—$\lg t$.

Однако величина $S_0$ в рассматриваемых условиях обычно неизвестна, что не позволяет использовать этот вид графиков. О величине $S_0$ можно судить лишь косвенно. Если начальное понижение уровня в расчетной наблюдательной скважине мало по сравнению с понижением во времени $S_t$, т. е. выполняется условие $S_0 \ll S_t$, вполне допустимо построение графиков в координатах $\lg S$—$\lg t$. Именно к таким случаям относится большинство примеров, рассмотренных в работе [106].

Иногда $S_0$ может быть определено приближенным расчетом и учтено при построении билогарифмических графиков. В противных случаях использование изложенного способа неправомерно.

При построении билогарифмических графиков следует также учитывать, что в координатах $\lg S$—$\lg t$ ввиду сильного сжатия шкалы понижений криволинейные графики часто имеют видимость прямолинейных. Поэтому выявленная закономерность всегда должна проверяться при построении соответствующего графика $S \div t^C$.

Одной из форм выражения гидравлических показателей, характеризующих закономерности изменения понижения уровня при его линейной зависимости от логарифма времени, является предложенный В. А. Грабовниковым и Б. М. Зильберштейном метод обобщенных параметров [38, 39].

При использовании этого метода реальные неоднородные пласты со сложной конфигурацией границ замеияются для прогноза некоторым условным неограниченным однородным пластом с параметрами, определяемыми по конечным участкам графиков $S - \lg t$.

Таким образом, метод обобщенных параметров следует рассматривать как удобную форму аналитической экстраполяции опытных закономерностей изменения уровня в сложных гидрогеологических условиях.

При этом следует иметь в виду, что если обобщенный коэффициент водопроводимости характеризует темп изменения уровня независимо от местоположения опытного куста, то обобщенный коэффициент пьезопроводности зависит от местоположения опытной и наблюдательных скважин относительно границ и может служить расчетным показателем только применительно к данной схеме расположения опытного куста, поэтому для расчета удобно использовать показатель $\frac{a_{об}}{r^2}$, как это и сделано в работе [39]. Противопоставление этого метода обычной гидравлической экстраполяции в плане возможности использования полученных данных для прогноза работы водозаборов при схемах, отличных от опытных, неоправдано.

После установления по данным опытно-эксплуатационных откачек эмпирического закона изменения уровня и гидравлических показателей, его выражающих (или обобщенных параметров), необходимо решить вопрос о том, насколько полно в них отражены гидрогеологические условия участка (все имеющиеся границы) и о возможности их использования при экстраполяции расхода откачки и изменении системы водоотбора.

При ограниченном дополнительном питании экстраполяция расхода должна производиться с учетом изменения темпа снижения уровня при выявленном законе его изменения, как это показано в главе 8. Примерами такого типа могут служить данные откачек на Щучинском, Поперечном и Бердичевском участках.

Вопрос о граничных условиях решается на основе достаточно детального изучения гидрогеологических условий участка и анализа развития депрессионной воронки по площади. Если какие-либо границы не нашли отражения в достигнутых закономерностях изменения уровня, то при использовании обобщенных параметров их предлагается учитывать аналитически [38].

Однако при этом следует иметь в виду, что при влиянии новых границ может измениться закон снижения уровня, в частности, полулогарифмический на степенной.

При дополнительном питании вопрос может быть решен на основе изучения общего баланса подземных вод месторождения и его учета при экстраполяции расхода, как это сделано на Щучинском и Поперечном участках.

В целом вопрос о возможности распространения полученных опытных закономерностей изменения уровня на другие условия водоотбора решается приближенно.

Глава 9

# ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ РАБОТ НА ПРИБРЕЖНЫХ УЧАСТКАХ

Как уже указывалось в главе 1, одной из основных задач опытных работ, проводимых при опробовании водоносных горизонтов, связанных с поверхностными водотоками и водоемами, является установление степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Степень гидравлической взаимосвязи определяется суммарным сопротивлением русловых отложений, обусловленным несовершенством вреза реки в водоносный горизонт, наличием слабопроницаемого заиленного слоя и неоднородностью русловых отложений. В настоящее время благодаря работам Ф. М. Бочевера [27], В. М. Шестакова [135], В. М. Григорьева [40], М. С. Хантуша [129] и других исследователей получены решения, позволяющие охарактеризовать закономерности движения подземных вод в речных долинах с учетом закольматированности русловых отложений, ширины реки и несовершенства ее вреза при установившемся движении, а также для некоторых случаев неустановившейся фильтрации. Случай отрыва уровня грунтовых вод от русла реки не рассматривается.

Гидравлическое сопротивление, связанное с наличием заиленного (закольматированного) слоя, В. М. Григорьев [40] предложил учитывать с помощью двух параметров: коэффициента сопротивления заиленного слоя ($A_0$) и коэффициента перетекания ($A$). Эти параметры определяются по следующим зависимостям:

$$A_0 = \frac{m_0}{K_0}; \tag{9.1}$$

$$A = \frac{1}{A_0 km}, \tag{9.2}$$

где $K_0$ и $m_0$ — соответственно, коэффициент фильтрации и мощность заиленного слоя;

$km$ — водопроводимость водоносного горизонта.

В работе В. М. Григорьева [40] приводятся крайне ориентировочные значения $A_0$, которые он рекомендует принимать для грубых

приближенных расчетов. Эти значения следующие: для горных рек 1—5 суток, для предгорных участков рек 5—10, для равнинных рек 10—15 и для зарегулированных небольших рек 20—30 суток.

Ф. М. Бочевером было получено решение, в котором суммарное сопротивление русловых отложений учитывается путем введения в формулу Форхгеймера дополнительного гидравлического сопротивления:

$$S = \frac{Q}{2\pi km}(R_1 + R_2), \tag{9.3}$$

где $R_1$ — гидравлическое сопротивление в условиях совершенной связи подземных и поверхностных вод;

$R_2$ — дополнительное гидравлическое сопротивление, обусловленное несовершенством и заиленностью русловых отложений.

Величина этого дополнительного сопротивления зависит от коэффициента перетекания (по В. М. Григорьеву) и ширины реки. Как показал анализ решения, полученного Ф. М. Бочевером, сопротивление русловых отложений оказывает наибольшее влияние на понижение уровня при приближении скважины к реке. Так, если принять сопротивление русловых отложений при расстоянии скважины до реки равном 100 м за 100%, то при уменьшении расстояния до 50 и 25 м, сопротивление русловых отложений будет соответственно составлять 165% и 250%. С приближением к реке значительно увеличивается и относительная роль сопротивления русловых отложений в общей величине сопротивления. Так, при расстоянии до реки 25 м, сопротивление русловых отложений будет составлять 32% от общего, при расстоянии 50 м — 20% и при расстоянии 100 м — 12%. (Все сопоставления приведены для широких рек при коэффициенте перетекания $10^{-4}$ 1/м, что при водопроводимости 500 м$^2$/сутки, соответствует коэффициенту сопротивления $A_0$ 20 суток. Значительное влияние на величину сопротивления русловых отложений может оказывать также ширина реки. Как показали исследования Ф. М. Бочевера, ширину реки можно не учитывать только при выполнении следующего соотношения:

$$b \geqslant \frac{1{,}5-2}{\sqrt{A}}, \tag{9.4}$$

где $b$ — половина ширины реки.

Для нешироких рек неучет ее ширины может занизить сопротивление русловых отложений в 1,5—2,0 раза.

Таким образом, для учета сопротивления русловых отложений при оценке эксплуатационных запасов подземных вод, необходимо определить водопроводимость основного водоносного горизонта, коэффициент сопротивления заиленного слоя и ширину реки. Если определение ширины реки и водопроводимости водоносного горизонта во многих случаях больших затруднений не вызывает, то методика установления параметра $A_0$ в полевых условиях разработана

очень слабо. Имеющиеся на этот счет предложения ряда авторов (Ф. М. Бочевер, Н. Н. Лапшин, Э. М. Хохлатов [28], Е. Л. Минкин [96]) основаны на предпосылке фильтрационной однородности водоносного горизонта на обоих берегах реки и, кроме того, не учитывают реального строения заиленного слоя. Точность расчетов по формулам, предлагаемым указанными исследователями, существенно зависит от правильности определения коэффициента водопроводимости.

Поэтому практически в расчетах для условий установившейся фильтрации наибольшее распространение получил метод учета общего сопротивления русловых отложений, предложенный В. М. Шестаковым [135] и основанный на увеличении истинного расстояния от водозабора до реки на величину $\Delta L$ (при этом принимается, что дополнительное сопротивление, связанное с увеличением длины потока на величину $\Delta L$, будет эквивалентно сопротивлению русловых отложений).

Величина дополнительного сопротивления $\Delta L$, которая используется при этом методе, связана с параметрами пласта и заиленного слоя следующей теоретической зависимостью:

$$\Delta L = \sqrt{kmA_0}\,\mathrm{cth}\,\frac{2b}{\sqrt{kmA_0}}. \qquad (9.5)$$

Методика определения величины $\Delta L$ по данным опытных работ и наблюдений за естественным режимом подземных вод была разработана В. М. Шестаковым, Ю. О. Зеегофером и Е. Л. Минкиным [135, 53, 96]. Этими же авторами было показано, что при большой ширине реки этот метод по сравнению со строгим решением Л. М. Альтшулера [1] дает хорошую сходимость при $\Delta L < 7L$ (ошибка в этом случае не превышает 20%). Массовые практические определения показали, что в реальных гидрогеологических условиях величина $\Delta L$, определяемая по предлагаемой методике, получается существенно зависимой от положения опытной и наблюдательной скважин, а также от метода определения (наблюдения за естественным режимом или опытные работы). Это связано с тем, что теоретические зависимости, принимаемые для расчетов, полностью не отражают особенностей геологического строения речных долин: фильтрационной неоднородности водоносных горизонтов, различий в мощности и проницаемости заиленного слоя вдоль русла, извилистости русла, несоответствия двухслойной схемы строения русловых отложений, принятой при выводе основных зависимостей, реальным природным условиям.

Особое значение из этих факторов, очевидно, имеет фильтрационная неоднородность водоносного горизонта. В то же время методика определения $\Delta L$, предложенная в работах [53, 96], основана на использовании соотношения понижений уровня в точках, расположенных между рекой и опытной скважиной, т. е. как раз по тому направлению, в котором особенно сильно проявляется фильтрационная неоднородность.

В связи этим в последние годы при оценке запасов на ряде объектов стал применяться метод определения $\Delta L$ путем решения обратной задачи с использованием формулы:

$$S = \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{2(L+\Delta L)-r_1}{r_1}. \quad (9.6)$$

При проведении откачки из нескольких скважин с равными дебитами вместо формулы (9.6) используется (9.7):

$$S = \frac{Q}{2\pi km}\left[\ln \frac{2(L+\Delta L)-r_1}{r_1} + \ln \frac{\sqrt{[2(L+\Delta L)-r_1]^2+r_{1-2}^2}}{\sqrt{r_1^2+r_{1-2}^2}} + \right.$$

$$\left. + \ln \frac{\sqrt{[2(L+\Delta L)-r_1]^2+r_{1-3}^2}}{\sqrt{r_1^2+r_{1-3}^2}} + \ldots + \ln \frac{\sqrt{[2(L+\Delta L)-r_1]^2+r_{1-n}^2}}{\sqrt{r_1^2+r_{1-}^2}}\right], \quad (9.7)$$

где $r_1$ — расстояние между наблюдательной скважиной, по которой определяется $\Delta L$, и опытной, расположенной с ней в створе, перпендикулярном реке, и имеющей номер 1;

$r_{1-2}$, $r_{1-3}$, . . ., $r_{1-n}$ — соответственно расстояния между опытной скважиной, расположенной в створе с наблюдательной, и опытной скважиной, имеющей номер 2, 3, . . ., $n$.

Определение величины $\Delta L$ по формуле (9.7) проводится несложным подбором.

Величина $\Delta L$, рассчитанная по формулам (9.6) или (9.7), в отличие от $\Delta L$, определяемой по теоретической зависимости (9.5), является интегральным параметром, в совокупности учитывающим фильтрационную неоднородность, заиленность русловых отложений, несовершенства вреза русла.

Для оценки изменчивости этой величины в зависимости от места расположения наблюдательной скважины и количества опытных скважин был проведен численный анализ с использованием строгого решения Ф. М. Бочевера [27]. При расчетах принималось, что наблюдательная скважина расположена между центральной скважиной и рекой, по направлению, перпендикулярному руслу, а центральная скважина расположена в 100 м от уреза реки. Расчеты проведены для значений $A_0$, равных 20 и 80 суткам, водопроводимости водоносного горизонта 500 м²/сутки и ширине реки 55 м.

Как следует из проведенных расчетов, наибольшее значение величина $\Delta L$ принимает на урезе реки (наименьшее в ближайшей наблюдательной скважине). Расхождение в величинах $\Delta L$, определенных по разным наблюдательным скважинам, незначительное (не превышает 10—20%). Однако эти расчеты были выполнены для однородного в фильтрационном отношении водоносного горизонта. Поэтому для того чтобы величина $\Delta L$ была действительно гидравлическим параметром, ее следует определять по наблюдательной скважине, расположенной в непосредственной близости от центральной, но на расстоянии, превышающем 0,7 мощности опробуемого горизонта для исключения влияния несовершенства скважины. Однако,

учитывая, что в неоднородных пластах абсолютные значения понижений могут сильно меняться даже на близких расстояниях, более целесообразно для определения $\Delta L$ использовать график $S—\lg r$ с учетом площадных ограничений, данных в главе 4.

Другими словами, для построения графика $S—\lg r$ нужно выбрать скважины, для которых их расстояния до центральной значительно меньше расстояния центральной скважины до реки. При этом, если на понижение уровня в ближайших наблюдательных скважинах накладывается влияние несовершенства, то на графике $S—\lg r$ эти точки будут «отскакивать» от прямой линии. При построении графика $S—\lg r$ при разбросе точек следует отдавать предпочтение скважинам, расположенным на луче параллельном реке. Расчеты эависимости величины $\Delta L$ от количества опробуемых скважин проводились по данным о понижении уровня в наблюдательной скважине, расположенной в 1 м от центральной скважины. Величина $\Delta L$ рассчитывалась при следующем количестве скважин: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 21. Расстояния между скважинами принимались равными 50 м. Таким образом, максимальная длина ряда равнялась 1000 м. Расчет был выполнен при следующих значениях параметров: коэффициент сопротивления заиленного слоя $A_0$ 80 суток, коэффициент водопроводимости $km$ 500 м²/сутки, ширина реки $2b$ 100 м, расстояние от ряда скважин до русла $L$ 50 м.

Как следует из приведенных расчетов, величина $\Delta L$ очень мало зависит от количества скважин при опытной откачке, хотя при увеличении числа скважин происходит некоторое увеличение $\Delta L$. Это увеличение при росте длины ряда от 100 до 1000 м составляет всего 12%, что дает расхождение в расчете величины понижения всего на 6%.

Таким образом, результаты проведенных расчетов убедительно показывают, что величина $\Delta L$, определенная по формулам (9.6) или (9.7), в однородных пластах получается примерно равной величине $\Delta L$, рассчитываемой по строгим теоретическим формулам независимо от места положения наблюдательной скважины и количества возмущающих скважин. В неоднородных же по фильтрационным свойствам водоносных горизонтах этот параметр (особенно если он определен по графику $S—\lg r$), будет суммарно учитывать все факторы, создающие дополнительное сопротивление.

Мы рассмотрели методы учета сопротивления русловых отложений. Общим для них является обобщенное значение параметра $A_0$ или $\Delta L$. Однако, с нашей точки зрения, наиболее целесообразен для оценки эксплуатационных эапасов подземных вод метод, основанный на определении величины $\Delta L$ графоаналитическим способом. Проведенные сопоставления показали, что в однородных водоносных горизонтах метод дает вполне достаточную для практических расчетов точность. Преимущество метода в том, что при его использовании мы получаем осредненное значение $\Delta L$ для области расположения водозаборных скважин, кроме того, решение прямой и обратной эадач проводится по одной и той же формуле, что в неоднородных

пластах имеет наиболее существенное значение (при применении других методов приходится пользоваться или отношением понижений уровня в двух разных точках или другими производными основных формул, что в неоднородных пластах может привести к большим ошибкам). Проведенные сопоставления расчетов $\Delta L$ по формуле (9.6) и по методам, основанным на соотношении понижений уровней в двух наблюдательных скважинах, на ряде конкретных объектов показали значительно больший разброс значений $\Delta L$ во втором случае.

Кроме того, этот метод наиболее прост и позволяет приблизить методику оценки эксплуатационных запасов подземных вод в долинах с закольматированными руслами к оценке запасов в условиях долин с совершенной гидравлической связью.

Входящая в формулы (9.6) и (9.7) величина коэффициента водопроводимости должна быть определена или по графикам $S$—lg $t$, когда имеется представительный период неустановившейся фильтрации, или по графикам $S$—lg $r$ (формуле Дюпюи) для наблюдательных скважин, расположенных по лучу, параллельному реке. При этом для исключения влияния реки целесообразно наблюдательные скважины на луче, параллельном реке, располагать так, чтобы расстояние от центральной до дальней наблюдательной скважины не превышало расстояние от центральной скважины до реки.

Таким образом, оценку эксплуатационных запасов, подземных вод в речных долинах с несовершенной связью поверхностных и подземных вод рекомендуется проводить с использованием интегрального параметра $\Delta L$, определенного графоаналитическим методом или путем решения обратной задачи по формулам (9.6) или (9.7). При значительной неоднородности водоносного горизонта и русловых отложений в ряде случаев целесообразно для более полного учета всех факторов, формирующих дополнительное сопротивление, провести одновременную откачку из трех скважин, образующих элемент будущего водозаборного ряда. Определение $\Delta L$ следует проводить по данным о понижении уровня в той точке, которая находится в наихудших условиях при работе водозабора (обычно в центре ряда).

В связи с тем что предлагаемая методика применима только при подпертом режиме фильтрации, величина понижения уровня на урезе реки не должна превышать допустимого понижения, определяемого по формуле

$$S_{\text{доп}} \leqslant H_0 + m_0, \tag{9.8}$$

где $S_{\text{доп}}$ — допустимое понижение уровня на урезе;
$H_0$ — высота слоя воды в реке;
$m_0$ — мощность заиленного слоя.

Расчет понижения уровня на урезе проводится также и с использованием параметра $\Delta L$, определенного по данным о снижении уровня в наблюдательной скважине, расположенной на урезе реки.

Все вышеизложенное относилось к обработке данных опытных откачек, закончившихся при стационарном режиме подземных вод,

так как методика определения сопротивления русловых отложений при нестационарной фильтрации практически не разработана. В тех случаях, когда при опытных откачках не будет достигнута стабилизация уровня, определение сопротивления русловых отложений следует проводить методом моделирования на аналоговых машинах путем решения обратной задачи.

Таким образом, при обработке данных опытных работ, проведенных в речных долинах, необходимо определить водопроводимость водоносного горизонта и интегральный параметр, характеризующий суммарное дополнительное сопротивление русловых отложений на линии расположения водозаборных скважин и на урезе реки.

Рассмотрим в качестве примера обработки данных опытной кустовой откачки на Киевском участке Курского водозабора в долине р. Сейм (по данным А. М. Прасоловой). Основной водоносный горизонт приурочен к четвертичным аллювиальным разнозернистым пескам и альб-сеноманским мелкозернистым пескам, подстилаемым слабопроницаемыми аптскими песками, залегающими на глинах. Общая мощность горизонта порядка 25 м. Для установления степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод и определения основных гидрогеологических параметров была проведена кустовая откачка из скважины 440 с дебитом 495 м³/сутки. Центральная скважина расположена в 44 м от уреза реки. Схема опытного куста и разрез по лучу показаны на рис. 18. При откачке уже в течение первых суток наблюдалась стабилизация уровня. Результаты откачки приведены в табл. 26.

Таблица 26

| № наблюдательной скважины | Расстояние до центральной скважины, м | Понижение уровня, м |
|---|---|---|
| 440—3 | 3,3 | 1,77 |
| 441 | 9,5 | 0,69 |
| 438 | 11,0 | 0,83 |
| 439 | 25,0 | 0,54 |
| 442 | 33,0 | 0,44 |
| 472 | 48,0 | 0,38 |
| 467 | 56,0 | 0,31 |
| 465 | 143,0 | 0,12 |

Обработка результатов откачки была проведена методом площадного прослеживания, для чего был построен график $S$—lg $r$ (см. рис. 18). На графике наблюдается некоторый разброс точек. Явно завышено понижение в затрубной скважине 440-3 в связи с несовершенством центральной скважины. Очевидно, по этой же причине несколько отскакивает вверх точка, соответствующая скважине 438. Скважина 465 находится за пределами площадных ограничений. В связи с этим при построении графика предпочтение было отдано точкам, расположенным на параллельном луче на расстоя-

нии, превышающем 0,7 мощности водоносного горизонта (скв. 439, 442, 472, 467).

Коэффициент водопроводимости, определенный по этому графику, равен 274 м²/сутки. Величина дополнительного сопротивления рассчитана по формуле

$$\Delta L = \frac{R - 2L}{2}, \tag{9.9}$$

где $R$ — абсцисса графика $S$—lg $r$ при $S = 0$, равная $\approx$160 м, а

$$\Delta L = \frac{160 - 2 \cdot 44}{2} = 36 \text{ м}.$$

В приведенном примере мы рассмотрели методику определения дополнительного сопротивления русловых отложений и коэффициента водопроводимости способом площадного прослеживания. Примеры определения водопроводимости по графикам $S$—lg $t$ изложены в главе 4. Как уже говорилось, величина сопротивления русловых отложений аналитическим (графоаналитическим) методом может быть определена только по данным откачек при стационарном режиме. Поэтому одной из важнейших задач анализа данных опытных откачек вблизи реки является доказательство стабилизации. Здесь следует отметить, что иногда может быть сделан неверный вывод о стабилизации режима подземных вод в связи с проявлением эффекта Болтона или в условиях двухслойной толщи, для которых характерно наличие ложностационарного периода. Анализ совместного проявления эффекта Болтона и влияние реки на форму временных графиков рассмотрены в главе 5.

Неверные выводы о наличии (или отсутствии) стабилизации могут быть сделаны и в связи с наложением на ход изменения уровня закономерностей естественного режима подземных вод. Для анализа влияния этого фактора необходимо проводить сопоставление хода изменения уровня в скважинах опытного куста с соответствующими изменениями уровня в наблюдательной скважине, находящейся заведомо за пределами области влияния опытной откачки. Методика таких сопоставлений, как и методика введения поправок, учитывающих естественный режим водоносного горизонта, рассмотрены в главе 11.

Предложенная методика определения сопротивления русловых отложений применима и тогда, когда опробуемый водоносный горизонт отделен от реки другим водоносным горизонтом (при отсутствии между ними разделяющих слабопроницаемых отложений). Полученная в результате опытных работ величина будет характеризовать суммарное сопротивление русловых отложений и вышележащего водоносного горизонта.

В тех случаях, когда опробуемый водоносный горизонт отделен от вышележащего, гидравлически связанного с рекой, слоем слабопроницаемых отложений, закономерности формирования режима подземных вод при откачках несколько усложняются. В верхнем

водоносном горизонте развивается депрессия, питание опробуемого горизонта происходит путем перетекания из вышележащих отложений через слабопроницаемые разделяющие слои. При этом для оценки эксплуатационных запасов целесообразно использовать расчетную схему перетекания с постоянным уровнем в питающем пласте, с применением интегрального значения коэффициента перетекания. Методика определения коэффициента и пример его расчета применительно к рассматриваемым условиям приведены в главе 7 (рис. 46).

В заключение отметим, что предлагаемый в настоящей главе прием определения $\Delta L$ путем решения обратной задачи по формуле Форхгеймера является приближенным, однако возможность его практического применения в широких пределах доказана путем сопоставления со строгим решением Ф. М. Бочевера [27]. При необходимости определения вместо интегрального параметра $\Delta L$ значения сопротивления заиленного слоя $\left(\frac{K_0}{m_0}\right)$ в однородных горизонтах можно воспользоваться методикой, основанной на этом строгом решении [28].

Глава 10

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КВАЛИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В УСЛОВИЯХ ХАОТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТА

Большинство из известных в настоящее время методов определения расчетных гидрогеологических параметров предназначено для однородных водоносных пластов. Но в реальных условиях неоднородность является непременным свойством всех геологических объектов. Следовательно, при обработке опытных данных этими методами, в частности методом Джейкоба, неоднородность водоносных пластов выступает как фактор аномальности. Вид и степень аномальности опытных закономерностей изменения уровня будут зависеть от характера неоднородности.

Геологическим объектам присущи два вида неоднородности: неоднородность закономерная и хаотическая.

Закономерная неоднородность связана с наличием литолого-фациальных границ, пликативных и разрывных тектонических нарушений, т. е. по существу это структурная неоднородность. Она схематизируется геометрическими формами с границами значительной протяженности и различной природы.

Хаотическая неоднородность связана с сингенетическими различиями и целым рядом эпигенетических проявлений в пределах одного пласта. Элементы хаотической неоднородности, как правило, значительно меньше области опытного, а тем более эксплуатационного возмущения. В тех же случаях, когда элементы хаотической неоднородности соизмеримы с областью опытного возмущения, их роль в формировании фильтрационного потока аналогична действию структурной неоднородности.

Разделение неоднородности на закономерную и хаотическую условно и прежде всего относительно времени, поскольку в зависимости от длительности возмущения одни и те же элементы неоднородности могут выступать в роли закономерной и хаотической неоднородности.

На относительность понятия фильтрационной неоднородности указывает М. В. Рац; в зависимости от объема зоны опробования один и тот же массив или водоносный горизонт представляется либо

неоднородным, либо квазиоднородным [101]. Практически Рац предлагает различать неоднородность высшего порядка, эффективную неоднородность и неоднородность низшего порядка. Неоднородность высшего порядка обусловлена неравномерным чередованием элементов, линейные размеры которых в $10^4$ и более раз меньше зоны опробования. Эффективная неоднородность обусловлена неравномерным чередованием элементов размерами в 10—100 раз меньше размеров зоны опробования. Неоднородность низшего порядка имеет место при размерах элементов больше размеров зоны опробования. В дальнейшем мы воспользуемся понятиями, предложенными М. В. Рацем.

С практической точки зрения чрезвычайно интересен вопрос о влиянии неоднородности на характер изменения понижения уровня при откачке во времени и по площади. Влияние закономерной неоднородности было рассмотрено в предыдущих главах, когда анализировались условия ограниченных водоносных пластов. Этот анализ показал, что при наличии плановых границ через определенное время происходит деформация графиков $S - \lg t$. Графики $S - \lg r$, построенные по наблюдательным скважинам с учетом критериев, приведенных в главе 4, по форме не отличаются от графиков, характерных для неограниченных пластов.

*Основные принципы интерпретации опытных данных в условиях* структурной неоднородности изложены в предыдущих главах. При их разработке мы игнорировали внутреннюю хаотическую неоднородность водоносных пластов. Практически, поскольку все виды неоднородности часто выступают в сочетании, нас интересует специфическое действие хаотической неоднородности на опытные закономерности изменения уровня.

Таким образом, предметом дальнейшего рассмотрения избирается эффективная неоднородность в пределах элементов неоднородности низшего порядка, размеры которых превышают размеры зоны опробования.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ХАОТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СТАТИСТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК

Говоря о хаотической фильтрационной неоднородности водоносного пласта, подразумевают обычно неоднородность водопроводимости по площади, причем изменения водоотдачи практически пренебрежимо малы. Исследования хаотической неоднородности производят на основе статистической модели фильтрационного поля, в частности, на модели случайных величин. При этом предполагают, что водопроводимость в хаотически неоднородном пласте есть случайная функция координат. Это положение содержит гносеологический элемент случайности, т. е. ту неопределенность, которая заключена в методах познания водопроводимости [130]. Сюда входят и способы опробования пласта той или иной сетью скважин.

Гидродинамические методы опробования хаотически неоднородных пластов обеспечивают получение интегральных параметров. Несмотря на то что возмущение производится в одной точке пласта, закономерность изменения уровня определяется свойствами некоторой области пласта, охваченной возмущением. При этом закон интегрирования определяется распределением по всему пласту элементов неоднородности с их параметрами [130].

Объем информации, заключенный в результатах опробования, зависит от длительности возмущения. С этой точки зрения результаты опробования хаотически неоднородного пласта системой кратковременных возмущений по некоторой редкой сети можно рассматривать как выборку случайных и независимых показателей фильтрационных свойств из генеральной совокупности. Каждое частное значение этой выборки, получаемое по данным возмущения в одной скважине, рассматривается как условно локальная характеристика с масштабами осреднения значительно меньшими, чем размеры исследуемого фильтрационного поля. Статистические оценки, получаемые на основе таких выборок, характеризуют обобщенные фильтрационные свойства опробуемого пласта и степень неоднородности. Необходимые для расчетного прогноза показатели определяются по законам современной теории оценок, выбор оценивающей функции для неизвестного параметра генеральной совокупности из множества возможных оценок базируется на критериях Р. А. Фишера. Искомые оценки должны быть состоятельными, эффективными, несмещенными и достаточными [141]. Их величины зависят от вида распределения экспериментальной выборки. Для нахождения оценок, удовлетворяющих указанным свойствам, Р. А. Фишер разработал метод максимального правдоподобия. На основе этого метода доказано, что состоятельными, эффективными, несмещенными и достаточными оценками нормального распределения являются среднеарифметическое и среднеквадратическое отклонения, такими же оценками для логнормального распределения будут максимально правдоподобное среднее и среднеквадратическое логарифмов [151, 103, 59].

Нахождение статистических оценок, удовлетворяющих критериям Фишера, не представляет существенной сложности при нормальном и логнормальном распределении. Для более сложных случаев эта задача затрудняется отсутствием типовых решений оценивающих функций.

Весьма важен вопрос о соответствии состоятельных, эффективных, несмещенных и достаточных оценок, определяемых на основе статистической обработки результатов опробования пласта одиночными кратковременными возмущениями, и гидродинамически эффективных параметров, определяющих реакцию водоносного пласта на возмущение и получаемых более длительными возмущениями, область которых значительно превышает размеры элементов неоднородности. Здесь необходимо отметить, что гидродинамические и статистическое понятия эффективности не совпадают. Статистическое

определение эффективности означает то, что из всех оценок данная обладает наименьшей дисперсией.

При разных законах распределения статистические оценки параметров оказываются различными. Существенное значение имеет вопрос о законе распределения опытных совокупностей. В настоящее время нет удовлетворительного теоретического обоснования какого-либо закона распределения вероятностей водопроводимости. Авторы ряда работ на основании положительного исхода оценок гипотез о распределении выборок пришли к убеждению, что распределение водопроводимости близко к логнормальному и в меньшем количестве случаев к нормальному законам [80, 105, 124].

Необходимо отметить, что заключение по статистической проверке гипотез о непротиворечии тому или иному закону зависит от размера выборки. В частности, вероятность того, что гипотеза о непротиворечии нормальному или логнормальному закону не отвергается, повышается с уменьшением выборки. Замечено, что положительное заключение о непротиворечии логнормальному закону при малой выборке с ростом ее становилось отрицательным. Эта особенность проверки гипотез о распределении отчетливее всего видна на примере критерия Колмогорова [78].

На практике обычно имеют дело с малыми выборками, поэтому исход проверки гипотез о распределении весьма условен, кроме того нередки случаи, когда гипотезы о нормальном и логнормальном законе отвергаются и при малых выборках. Таким образом, поиски состоятельных, эффективных, несмещенных и достаточных статистических оценок по малым выборкам — задача достаточно неопределенная. Следовательно, исходя из законов теории оценок, можно сказать, что в природных условиях возможны такие случаи, когда эффективные параметры не равны известным статистическим оценкам.

До сих пор мы сознательно отвлекались от качества частных значений, предполагая, что в отношении достоверности они безупречны. На практике дело обстоит иначе. Коэффициенты водопроводимости, определяемые по одиночным возмущениям, ввиду прискважинных помех и ограниченных возможностей для интерпретации, как правило, оказываются искаженными [106]. Поэтому в большинстве случаев мы располагаем смещенными выборками. Смещение выборок может быть и из-за неравномерности сетей опробования. Обычно наибольшее количество скважин располагается в пределах наиболее перспективных участков. Статистические оценки, найденные по таким выборкам, не дают объективных оценок всего фильтрационного поля. На основании вышеизложенного можно заключить, что статистические оценки, получаемые по выборкам частных значений — результатов одиночных кратковременных возмущений, не являются эффективными параметрами водоносного пласта.

Основным видом опытов, гарантирующим получение основных расчетных параметров, являются кустовые откачки (выпуски). Авторы работы [59] предлагают оценивать ошибки среднего по результатам кустовых откачек на основе статистических оценок. По этому

поводу следует заметить, что в пределах элементов неоднородности низшего порядка рассеяния значений коэффициента водопроводимости (фильтрации) бывают обусловлены ошибками интерпретации, исключение которых практически устраняет рассеяние искомых коэффициентов. Следовательно, рассеяние значений $km$ и $k$ есть признак ошибок, которые можно устранить тщательной интерпретацией опытных данных. Использование в этих целях статистических оценок неоправдано.

Действие факторов смещения результатов одиночного опробования чаще всего бывает соизмеримым для всех частных значений выборки, поскольку опробование водоносного горизонта одиночными возмущениями производится в однотипно оборудованных поисковоразведочных скважинах. Следовательно, в тех случаях, когда существенного смещения выборок за счет неравномерности сети опробования не предполагается, статистические оценки можно использовать для относительной характеристики степени неоднородности водопроводимости и, в частности, как классификационные показатели.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО СТЕПЕНИ ХАОТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ И СВЯЗЬ ЭФФЕКТИВНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СО СТАТИСТИЧЕСКИМИ ОЦЕНКАМИ

Разработка классификации неоднородности водоносных горизонтов включает обоснование признака анализируемого качества, выбор показателя изменчивости признака из статистических оценок, установление градаций показателя.

Поскольку исследуется неоднородность водопроводимости водоносных горизонтов, то в качестве признака должен служить коэффициент водопроводимости. Но учитывая, что нас интересует относительная характеристика неоднородности, можно использовать в качестве признака удельный дебит однотипно оборудованных скважин. Это избавляет от излишних расчетных операций и от дополнительных искажений признака, тем более что получение его действительных значений при одиночном опробовании затруднительно.

Таким образом, для характеристики степени неоднородности водоносного горизонта необходимо располагать множеством значений коэффициента водопроводимости или удельного дебита, полученных при опробовании интересующего участка системой одиночных кратковременных возмущений. Удельный дебит и определенный по данным одиночных возмущений коэффициент водопроводимости как измеряемый признак относится к случайным величинам, что определяет способы последующей обработки множества опытных данных для получения основных статистических оценок. Существуют графоаналитические и аналитические способы обработки, описание которых можно найти в работах [106, 141]. Во многих случаях для получения классификационных показателей достаточно пользоваться

более простым графоаналитическим способом, т. е. способом спрямленного вероятностного графика накопленных частостей.

Показатели неоднородности выбираются из числа статистических оценок, представляющих меры рассеивания измеряемого признака. К мерам рассеивания относится размах ($R$), среднее квадратическое отклонение натуральных значений признака ($s$) или его логарифмов ($\sigma_{lg}$), дисперсия ($s^2$), коэффициент вариации ($W$).

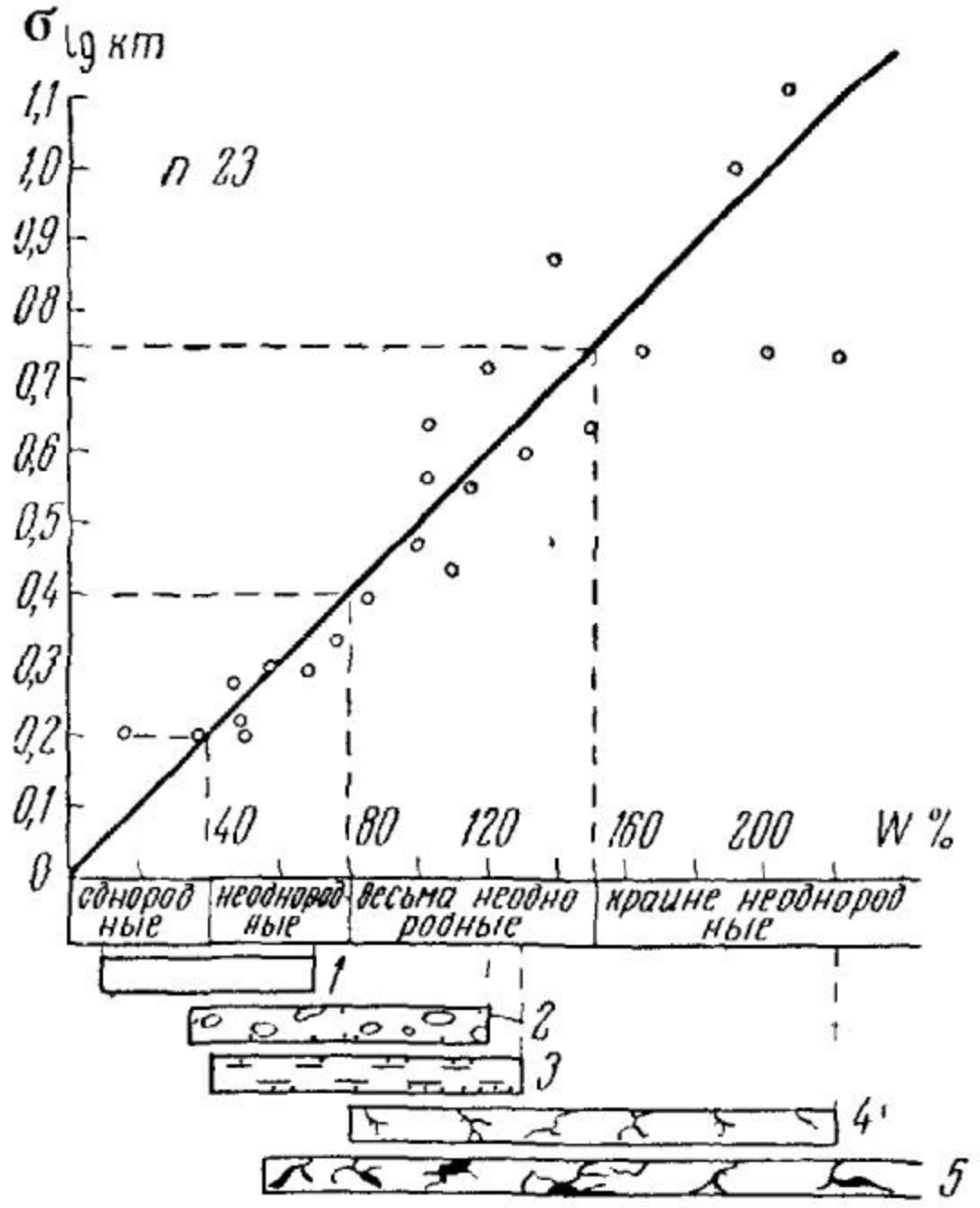



Рис. 66. Классификация водовмещающих пород по степени хаотической неоднородности

*1* — четвертичные и неоген-четвертичные аллювиальные пески, *2* — четвертичные аллювиальные и аллювиально-пролювиальные галечники и гравийно-галечники, *3* — меловые слоистые морские пески и слабые песчаники, *4* — трещинные некарбонатные коллекторы, *5* — трещинные и трещинно-карстовые карбонатные коллекторы

Исходя из того, что в большинстве случаев распределение экспериментальных совокупностей коэффициента водопроводимости не противоречит логнормальному закону, в работе [102] было предложено в качестве классификационного показателя использовать среднеквадратическое отклонение логарифмов. В указанных пределах это удобный показатель рассеивания. Но, как уже отмечалось, распределение опытных совокупностей коэффициента водопроводимости (удельного дебита) не ограничивается логнормальным законом. В этих случаях среднеквадратическое логарифмов не показательно. В поисках более универсального показателя степени рассеивания было произведено сопоставление среднеквадратического логарифмов с коэффициентом вариации. Реэультаты сопоставления представлены на рис. 66. Как видно, для логнормального распределения между двумя этими показателями существует достаточно тесная корреляционная зависимость, свидетельствующая об их практической равноценности. Коэффициент вариации как среднеквадратическое отклонение в процентах от среднеарифметического несколько более нагляден потому, что является относительной оценкой.

Таким образом, последующие градации мы производим по двум показателям — среднему квадратическому логарифмов и коэффициенту вариации.

Изучение изменчивости коэффициента водопроводимости (удельного дебита) опирается на материалы разведки по 100 участкам. Для анализа использован фактический материал, содержащийся также в работе [102]. Последний в большинстве случаев представлен малыми выборками, включающими 10—15 значений, поэтому отдельные положения, содержащиеся в упомянутой работе, проверены на примере еще 30 выборок большего размера — 15—90 с преобладанием 25—30 значений.

На примере указанного количества выборок, представляющих широкий диапазон водовмещающих пород, установлено, что все случаи находятся в интервале среднего квадратического логарифмов $\sigma_{lg} = 0{,}05 - 1{,}3$ и коэффициента вариации $W = 15—220\%$.

В основном распределения не противоречат логнормальному закону, иногда не противоречат нормальному закону и в редких случаях противоречат обоим законам.

В работе [101] делается попытка увязать вероятность логнормального и нормального законов с числом каналов фильтрации. По этому признаку типы распределения проницаемости для грубопористых и мелкопористых пород должны быть различными. Но на имеющихся примерах можно было убедиться, что непротиворечие нормальному распределению, можно встретить и среди пористых однородных коллекторов ($W \approx 50\%$), и среди весьма неоднородных трещинных коллекторов ($W \approx 200\%$).

По результатам обработки множества выборок отмечается вполне определенная связь среднего квадратического логарифмов и коэффициента вариации с типом коллекторов (см. рис. 66; табл. 27).

Таблица 27

| Водовмещающие породы | Число выборок | Размер выборок | Среднеарифметическое | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $\sigma_{lg}$ | $W$, % |
| Четвертичные и неоген-четвертичные аллювиальные пески . . . . . | 10 | 10—90 | 0,16 | 30 |
| Четвертичные аллювиальные и аллювиально-пролювиальные галечники и гравийно-галечники . . . . . | 15 | 10—64 | 0,30 | 60 |
| Меловые слоистые морские пески и слабые песчаники . . . . . | 8 | 14—34 | 0,35 | 70 |
| Трещинные и трещинно-карстовые карбонатные коллекторы . . . . . | 19 | 11—84 | 0,56 | 110 |
| Трещинные некарбонатные коллекторы | 14 | 13—91 | 0,65 | 130 |

Выделенные группы коллекторов, различия которых заранее известны, отличаются величинами средних $\sigma_{lg}$ и $W$ и протяженностью их интервалов (см. рис. 66). Избранные показатели действительно характеризуют степень фильтрационной неоднородности водовмещающих пород.

Все многообразие в различной степени неоднородных водоносных горизонтов целесообразно подразделить по величинам среднего квадратического логарифма и коэффициента вариации на четыре группы независимо от типа распределения (табл. 28).

Таблица 28

| Степень неоднородности | Интервал показателей | |
|---|---|---|
| | $\sigma_{lg}$ | W, % |
| Однородные | < 0,2 | < 40% |
| Неоднородные | 0,2—0,4 | 40—80 |
| Весьма неоднородные | 0,4—0,75 | 80—150 |
| Крайне неоднородные | > 0,75 | > 150 |

Данная классификация носит служебный характер применительно к проблеме определения основных гидрогеологических параметров. Для оценки эксплуатационных запасов подземных вод весьма и крайне неоднородные градации могут быть объединены, так как при такой степени неоднородности выбор методики разведки и оценки эксплуатационных запасов подземных вод базируется на одинаковых принципах.

Рассмотрим вопрос о степени соответствия статистических параметров их эффективным расчетным значениям. Под эффективными параметрами при этом понимаются значения водопроводимости и пьезопроводности такого однородного водоносного горизонта, в котором расчетные значения понижений уровня в зоне квазистационарного режима на определенные моменты времени близки к значениям понижений в рассматриваемом неоднородном пласте. Для анализа этого вопроса используем экспериментальные данные, полученные при применении методов аналогового моделирования. Подобная задача применительно к нормальному распределению ставилась И. С. Пашковским [94].

На электропроводной бумаге было создано кусочно-неоднородное поле, проводимость которого изменялась в пределах 0—200 м²/сутки. Математическое ожидание нормально распределенной совокупности частных значений было равно 100 м²/сутки, стандартное отклонение 50 м²/сутки и коэффициент вариации 50%.

Эффективный коэффициент водопроводимости, определенный по угловым коэффициентам графиков временного прослеживания понижения, оказался равным математическому ожиданию, которое при заданном нормальном законе равно среднеарифметическому. Таким образом, приведенный пример показывает, что величины эффективного коэффициента водопроводимости и среднеарифметического при нормальном распределении совпадают.

Соответствие статистических оценок и гидродинамических эффективных значений параметров при других законах распределения

проверялось с помощью моделирования на сеточных машинах УСМ-1 и МСМ-1, Задача решалась следующим образом. Были построены модели неоднородного пласта с незакономерным расположением элементов неоднородности, распределение которых или не противоречило логарифмически нормальному закону или противоречило как нормальному так и логнормальному закону. Гипотеза о законе распределения проверялась по критерию Пирсона (рис. 67). Всего было рассмотрено четыре модели (три при логнормальном и одна при неопределенном законе распределения), отличающиеся величиной среднеквадратичного отклонения логарифма водопроводимости ($\sigma$). Положение элементов неоднородности определялось жеребьевкой (табл. 29).

Таблица 29

| № задачи | Количество элементов неоднородности | Закон распределения | Среднеарифметическое значение водопроводимости $\overline{x}$ | Среднегеометрическое значение водопроводимости $\overline{x}$ | Среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\lg km}$ | Максимально правдоподобное значение $\overline{x}$ | Коэффициент водоотдачи $\mu$ ($\mu^*$) | Моделирующее устройство |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 81 | Логнормальный | 615 | 480 | 0,3 | 600 | 0,01 | УСМ-1 |
| 2 | 729 | То же | 1850 | 575 | 0,7 | 2040 | 0,01 | УСМ-1 |
| 3 | 361 | » | 557 | 300 | 0 5 | 573 | 0,001 | МСМ-1 |
| 4 | 342 | Неопределенный | 4100 | 500 | 0,99 | — | 0,001 | МСМ-1 |

В первой, второй и третьей задачах рассматривался ряд вариантов с различным положением возмущающей скважины. По результатам моделирования строились графики $S - \lg t$, $S - \lg r$, $S - \lg \frac{t}{r^2}$, анализировался вид этих графиков и определялись основные гидрогеологические параметры (коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности).

В табл. 30 представлены результаты расчета основных гидрогеологических параметров, а на рис. 67 схема модели с изопьезами по одному из вариантов рассматриваемой задачи.

В табл. 30 способами временно́го и площадного прослеживания получены близкие значения основных параметров, и рассчитанная по ним водоотдача близка к заданному значению. Эти параметры, полностью определяющие реакцию водоносного горизонта на возмущение, можно квалифицировать как эффективные.

Как следует из вышеизложенного, значение эффективного коэффициента водопроводимости при нормальном распределении близки к среднеарифметическому, при логнормальном — среднегеометрическому (расхождения не превышают 20%), при нерегулярном

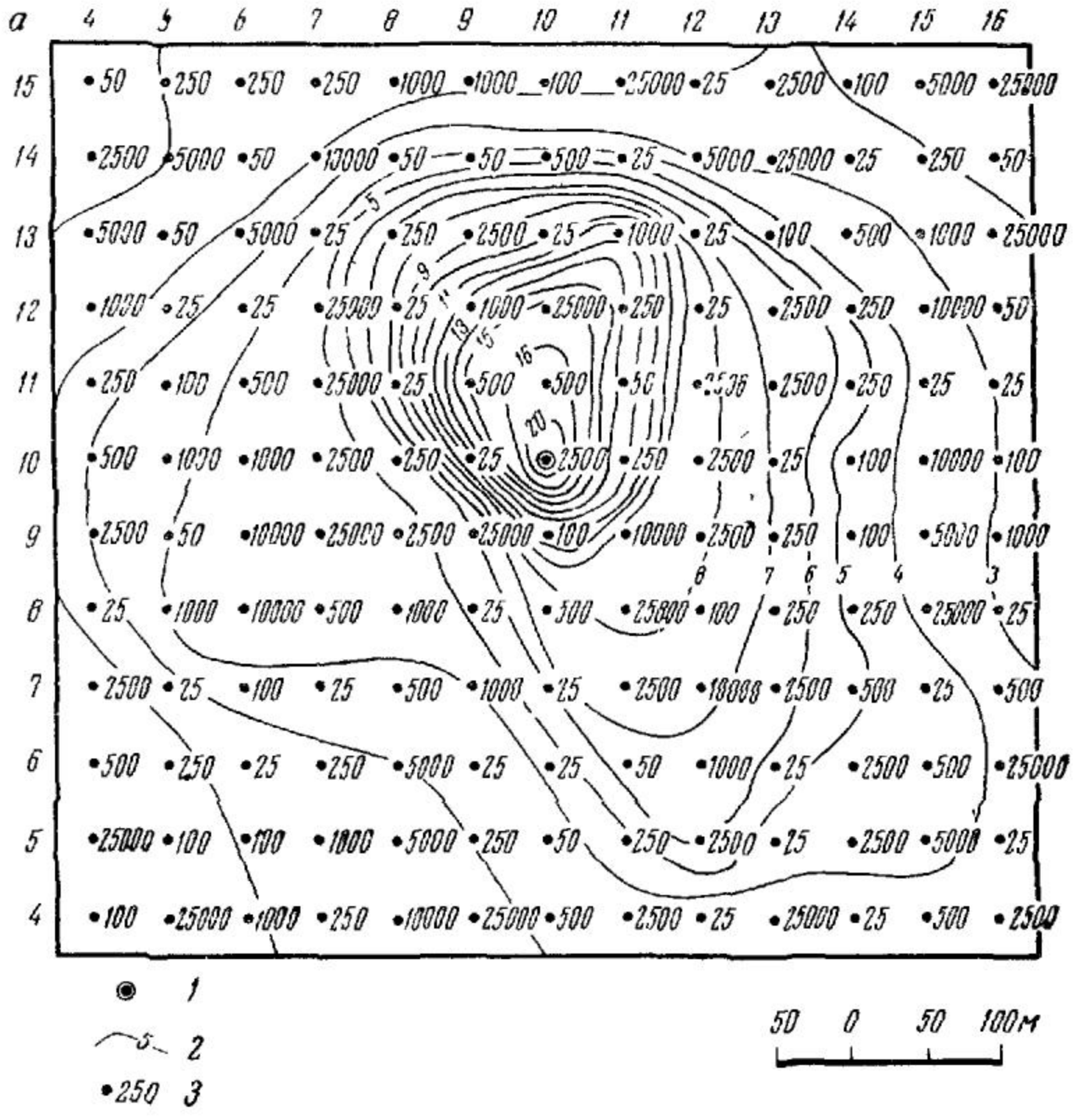


Рис. 67. Модель хаотически неоднородиого напорного водоносного пласта (на МСМ-1).

*а* — центральная часть модели фильтрационного поля при $\mu = 10^{-3}$, $Q = 10^4$ м³/сутки, $t =$ = 30 суток. *1* — водозабор; *2* — изолинии понижений; *3* — центр блока и значения *km*; *б* — полигон частот значений *km* блоков. Статистические оценки: $n = 342$, $\bar{x} = 4100$ м²/сутки, $s = 7770$ м²/сутки, $w = 190\%$, $\tilde{x} = 500$ м²/сутки, $\sigma_{\lg km} = 0{,}99$, $D = 25$ м²/сутки, $M =$ = 500 м²/сутки

Таблица 30

| № задачи | Водопроводимость по данным моделирования, м²/сутки | | Расхождение по среднегеометрическим, % | Пьезопроводность по данным моделирования | | Водоотдача $\mu = \frac{km}{a}$ | Расхождение с заданным значением водоотдачи, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | по временному прослеживанию $S - \lg t$ | по площадному прослеживанию $S - \lg r$ | | по временному прослеживанию | по площадному прослеживанию | | |
| | | | | $a$, м²/сутки | | | |
| 1 | 410 | 422 | 15 | $4{,}1 \cdot 10^4$ | $4{,}5 \cdot 10^4$ | $\approx 0{,}01$ | $\sim 0$ |
| 2 | 520 | 504 | 12 | $5{,}8 \cdot 10^4$ | $3{,}6 \cdot 10^4$ | $\approx 0{,}01$ | $\sim 0$ |
| 3 | 270 | 246 | 16 | $3{,}0 \cdot 10^5$ | $2{,}4 \cdot 10^5$ | 0,001 | $\sim 0$ |
| 4 | 225 | 258 | 95 | $2{,}1 \cdot 10^5$ | $2{,}9 \cdot 10^5$ | 0,001 | $\sim 0$ |

распределении — не контролируются статистическими оценками. В то же время расхождение между среднеарифметической величиной водопроводимости и эффективным ее значением при логнормальном и перегулярном распределении очень существенны, причем это различие увеличивается с ростом степени неоднородности водоносного горизонта. Так, если при $\sigma = 0{,}5$ среднеарифметическое превышает эффективное в 2,2 раза, то при $\sigma = 0{,}7$ и $\sigma = 0{,}99$ соответственно в 3,6 и 18 раз.

Таким образом, как показывают результаты анализируемых экспериментов, определение эффективных параметров по статистическим оценкам среднего должно производиться на основе конкретного распределения. Несомненно, этот вывод, полученный в результате анализа небольшого экспериментального материала, является предварительным и исследования в этом направлении должны быть продолжены.

Численный анализ оценок среднего при логнормальном распределении показывает, что при $\sigma_{\lg} < 0{,}3$ различие между среднеарифметическим и среднегеометрическим несущественно. Следовательно, при нормальном распределении и логнормальном при $\sigma_{\lg} < 0{,}3$ определение эффективных параметров возможно на основе среднеарифметического, а при $\sigma_{\lg} > 0{,}3$ — на основе среднегеометрического.

## 3. ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ ОПЫТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ В ХАОТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

Анализ закономерностей изменения уровня в хаотически неоднородном пласте проведен по результатам моделирования весьма неоднородного водоносного пласта. Среднеквадратическое логарифмов $\sigma_{\lg} = 0{,}99$ и коэффициент вариации $W = 190\%$ этого пласта характеризуют наибольшую хаотическую неоднородность. Заданные условия модели изложены в предыдущем разделе (задача 4). Размещение элементов неоднородности в основной части фильтрационного

поля и заданные условия видны на рис. 67. На этом же рисунке показаны изолинии понижения на момент $t = 30$ суток. В последующие моменты времени ($t = 80$, 160, 320 суток) рельеф депрессионной воронки, зафиксированный на момент $t = 30$ и 10 суток, практически не изменялся. Результаты моделирования обработаны способом временно́го, площадного и комбинированного прослеживания.

На рис. 68 представлены результаты временно́го и комбинированного прослеживания. Комбинированные графики сохраняют прямолинейную полулогарифмическую форму независимо от местоположения пунктов съема замеров. Результаты комбинированного прослеживания представлены семейством параллельных полулогарифмических прямых. Величина взаимного смещения отдельных графиков зависит от конкретного местоположения точки съема замеров в том или ином блоке с различными значениями $km$ и удаленностью точек от возмущающего блока. Коэффициенты водопроводимости, определяемые по угловым коэффициентам временных (комбинированных) графиков прослеживания, изменяются незначительно (200—250 м²/сутки), их изменения не зависят от хаотической природы неоднородности. Среднее значение $km = 225$ м²/сутки.

Коэффициенты пьезопроводности, определяемые по начальным ординатам и угловым коэффициентам комбинированных графиков, оказываются рассеянными в пределах одного порядка в интервале $(0{,}5—7) \cdot 10^5$ м²/сутки. Рассеяние значений коэффициента пьезопроводности связано с природой хаотической неоднородности, поскольку при постоянной водоотдаче пьезопроводность будет зависеть от величины водопроводимости конкретного блока. Степень рассеяния уменьшается с удалением точек съема замеров от возмущающего блока.

Распределение рассеянной совокупности значений коэффициента пьезопроводности не противоречит логнормальному закону с параметрами $\check{C} = 1{,}6 \cdot 10^5$ м²/сутки, $\sigma_{\lg} = 0{,}288$, $\bar{C} = 2{,}1 \times \times 10^5$ м²/сутки, ($\check{C}$ — среднегеометрическое, $\bar{C}$ — среднеарифметическое). Определим пьезопроводность из известного отношения $a = \frac{km}{\mu}$, подставив значение коэффициента водопроводимости, полученное по результатам комбинированного прослеживания $km = 225$ м²/сутки, и заданную величину водоотдачи $\mu = 10^{-3}$: $a = \frac{225}{10^{-3}} = 2{,}2 \cdot 10^5$ м²/сутки.

Полученное значение близко среднеарифметическому из совокупности коэффициентов пьезопроводности, определенных в различных точках исследуемого фильтрационного поля.

На рис. 69 показаны результаты площадного прослеживания понижения. График площадного прослеживания, построенный на момент $t = 80$ суток, представлен облаком точек, вытянутым по оси расстояний; степень рассеяния уменьшается с удалением от возмущающего блока. Характер рассеяния не меняется для поздних

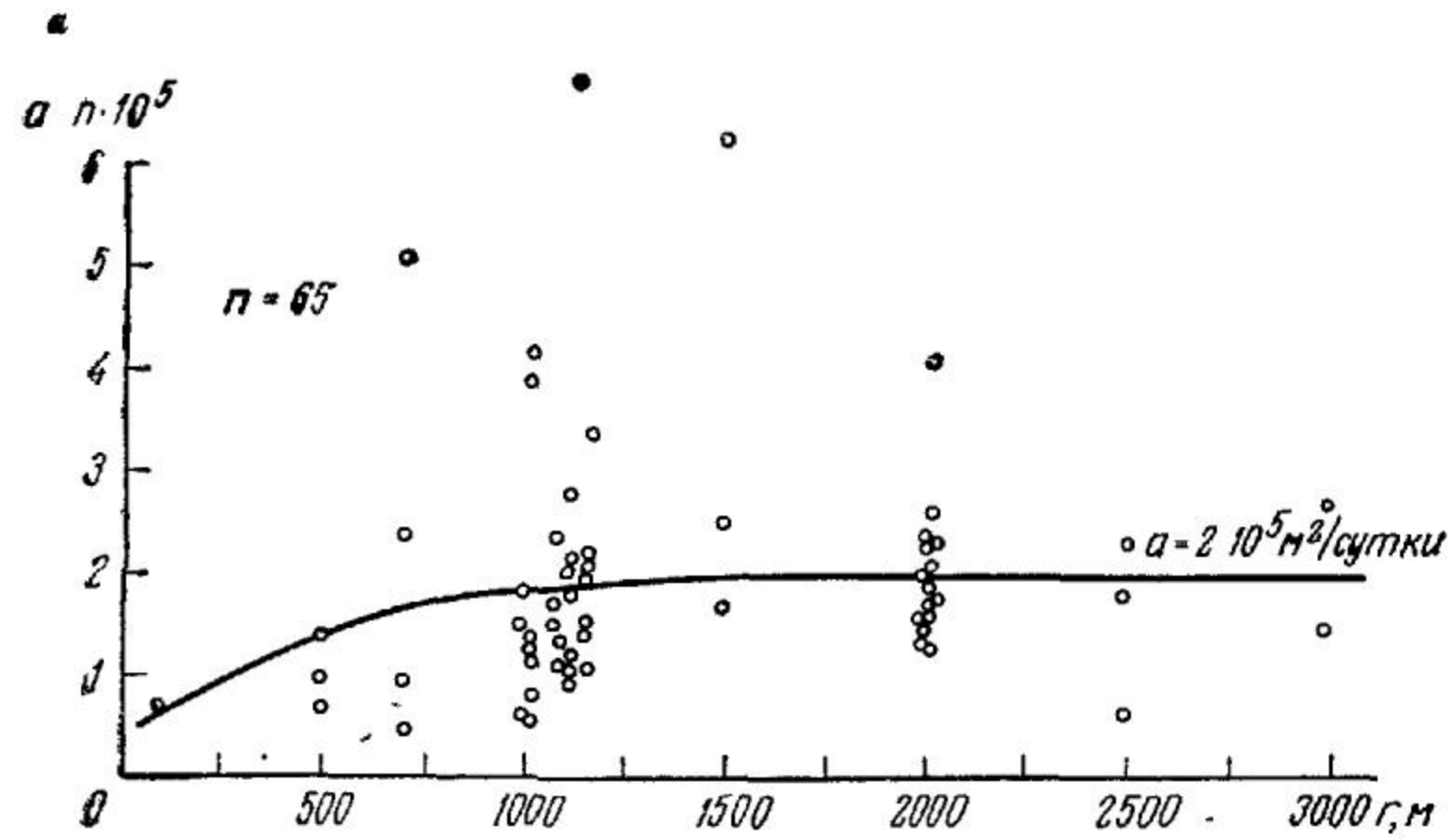



**Рис. 68. Результаты моделирования по схеме на рис. 67.**

*а* — графики рассеяния коэффициентов пьезопроводности и водопроводимости; *б* — графики комбинированного прослеживания: *1* — для блока 8—10 с $km$ = 500 м²/сутки; *2* — для блока 10—8 с $km$ = 250 м²/сутки; *3* — для блока 10—9 с $km$ = 25 м²/сутки.

| № блока | r, м | C | $km$, м²/сутки | A | lg a | a, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 8—10 | 1000 | 8,2 | 223 | 45,6 | 5,2 | $1{,}6 \cdot 10^5$ |
| 10—8 | 1000 | 7,8 | 235 | 40,4 | 4,84 | $6{,}9 \cdot 10^4$ |
| 10—9 | 500 | 8,2 | 223 | 44,0 | 5,01 | $1{,}0 \cdot 10^5$ |

моментов прослеживаний ($t = 160$; 320 суток), но меняется для ранних моментов ($t = 10$; 30 суток).

Таким образом, в пластах с хаотической неоднородностью, степень которой характеризуется в данном случае коэффициентом



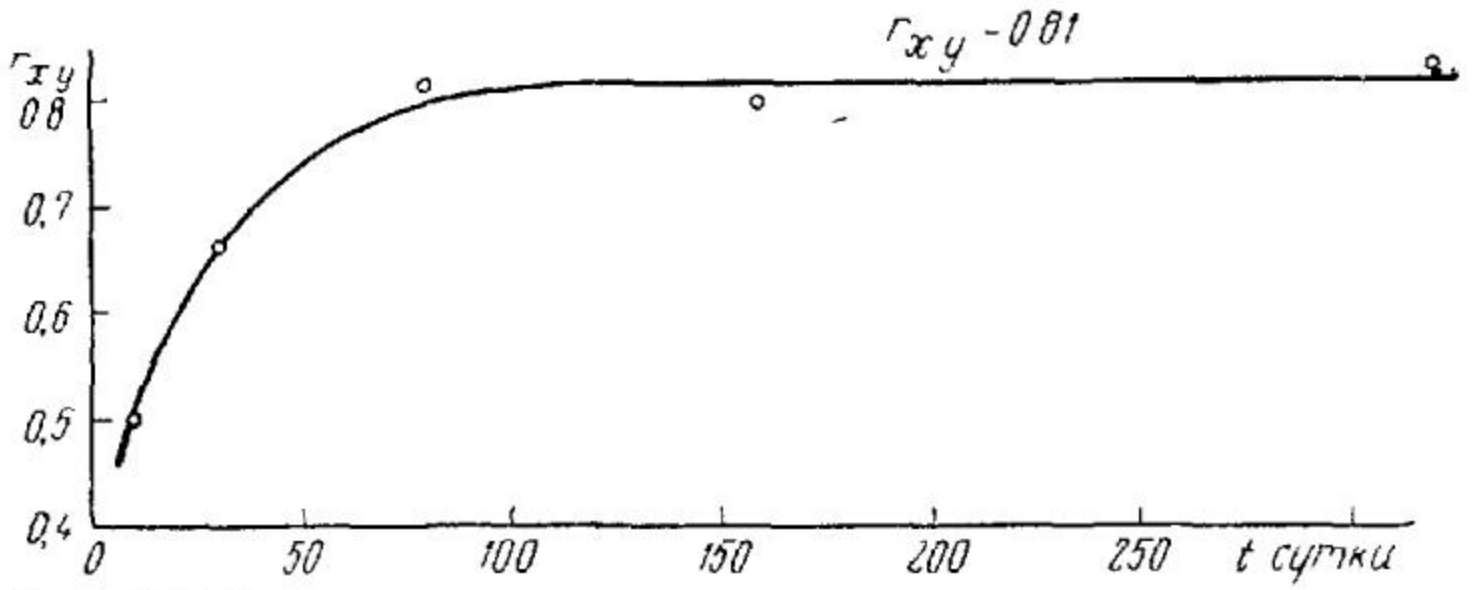




Рис. 69. Результаты площадного прослеживания понижения по данным моделирования (условия см. на рис. 67).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}} \qquad \tilde{b} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

| $t$, сутки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| 80 | 263 | $2{,}9 \cdot 10^5$ |
| 160 | 258 | $2{,}9 \cdot 10^5$ |
| 320 | 258 | $3{,}4 \cdot 10^5$ |

вариации $W = 190\%$, по сравнению с однородными пластами наблюдается нарушение линейной полулогарифмической площадной зависимости. Функциональная зависимость переходит в корреляционную. Важной характеристикой корреляционных зависимостей являются показатель силы и направления линейной связи — эм-

пирический коэффициент корреляции ($r_{x,y}$). Расчетная формула для определения коэффициента корреляции помещена на рис. 69, методика расчетов подробно изложена в работе [141].

Коэффициент корреляции определен для графиков площадного прослеживания на моменты: $t = 10$; 30; 80; 160; 320 суток. Результаты определений представлены в виде графика $r_{x,y} = f(t)$ на рис. 69. В интервале 10—50 суток, т. е. в пределах практикуемой продолжительности возмущения, коэффициент корреляции находится в пределах $r_{x,y} = 0{,}5$—$0{,}7$, характеризуя слабую связь понижения с логарифмом расстояния. Позднее отмечается постоянная и заметная связь этих величин, так как $r_{x,y}$ становится постоянным и равным 0,8. Заметим, что величина коэффициента корреляции изменяется в пределах 0—1; при $r_{x,y} = 0$ связь между анализируемыми величинами отсутствует, при $r_{x,y} = 1$ корреляционная связь переходит в функциональную. Зависимость коэффициента корреляции от времени объясняется изменением величины выборки и пространственным ее смещением. Выборка объединяет точки съема информации, попадающие в зону квазистационарности. При малых временах таких точек меньше и все они расположены ближе к возмущающей точке. Но с приближением к возмущающей точке степень рассеяния значений понижения возрастает.

Убедившись в заметной корреляционной площадной закономерности, определим параметры исследуемого водоносного пласта через коэффициент линейной регрессии $\tilde{b}$, характеризующий расчетный угол наклона площадного графика. Формула для расчета $\tilde{b}$ помещена на рис. 69, методика определения подробно излагается в работе [141].

Поскольку $\tilde{b}$ представляет собой угловой коэффициент графика, для определения параметров используем известные формулы Джейкоба для площадного прослеживания в однородных пластах. Определения производим для моментов, характеризующихся постоянством и максимальной величиной коэффициента корреляции, т. е. при $t = 80$; 160; 320 суток. Результаты расчетов помещены на рис. 69. Как видно, $km = 260$ м²/сутки, $a = 2{,}9 \cdot 10^5$ м²/сутки. Полученные величины близки результатам комбинированного прослеживания (табл. 31).

Полученные параметры полностью определяют временную и приближенно площадную закономерность изменения уровня в возмущенном пласте. Как уже говорилось, такие параметры можно квалифицировать как эффективные.

Таблица 31

| Способ обработки | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|
| $S - \lg \frac{t}{r^2}$ | 225 | $2{,}1 \cdot 10^5$ |
| $S - \lg r$ | 260 | $2{,}9 \cdot 10^5$ |

Аналогичная задача решалась на модели И. С. Пашковским при условиях, указанных в разделе 2, но при значительно меньшем коэффициенте вариации $W = 50\%$. Результаты опыта оказались аналогичными: временна́я закономерность сохранялась функциональной, а площадная — оказывалась корреляционной. Следовательно, при квазистационарном режиме уклон временны́х графиков и коэффициент линейной регрессии площадных графиков определяется эффективными параметрами. Поскольку коэффициенты вариации в описанных опытах ($W = 50\%$ и $W = 190\%$) определяют практически крайние случаи, из реальных условий по степени неоднородности можно сделать вывод — наличие функциональной временно́й и корреляционно́й площадной закономерности изменения уровня является характерным свойством всех реальных в различной степени хаоти́чески неоднородных пластов при значительно меньших размерах элементов неоднородности по сравнению с размерами области возмущения.

## 4. ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В ХАОТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

В предыдущем разделе показано, что временные и площадные закономерности понижения в хаотически неоднородных пластах являются качественно различными, поэтому различны и особенности определения параметров способами временно́го и площадного прослеживания.

### Определение параметров способом временно́го (комбинированного) прослеживания

По достижении квазистационарного режима временные и комбинированные закономерности изменения уровня являются полулогарифмическими прямыми. Их уклон практически не зависит от количества точек съема информации, их местоположения, степени неоднородности и длительности возмущения. Следовательно, определяемые по уклонам при квазистационарном режиме коэффициенты водопроводимости являются эффективными.

Подтверждение независимости коэффициента водопроводимости от длительности возмущения в пластах с эффективной неоднородностью достигается анализом опыта эксплуатации (табл. 32).

Как следует из таблицы, при возрастании длительности эксплуатационного возмущения и многократном увеличении радиуса зоны квазистационарности коэффициент водопроводимости стабилен или меняется в относительно небольших пределах и близок к той величине, которая определена при опытном возмущении. Степень неоднородности в первом примере близка к максимальной ($W_{km} = 163\%$), во втором примере она существенно меньше ($W_{km} = 99\%$).

Таблица 32

| Участок | Длительность возмущения, сутки | Радиус зоны опробования, м | Коэффициент водопроводимости, м²/сутки | Коэффициент пьезопроводности, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|
| **Балкашинский** | 2,9 | 500 | 192 | — |
| (трещинный водоносный | 375,0 | 11500 | 129 | $3{,}9 \cdot 10^4$ |
| горизонт $W_{km} = 163\%$) | 1800,0 | 13000 | 138 | $4\,4 \cdot 10^4$ |
| **Саксонский** | 4,0 | 1000 | 66 | — |
| (пластово-трещинный | 865,0 | 5000 | 63 | — |
| водоносный горизонт | 1170,0 | 6100 | 63 | — |
| $W_{km} = 99\%$) | | | | |

Независимость величин водопроводимости и пьезопроводности от местоположения возмущения можно видеть на примере варианта задачи 3 (см. табл. 29), выполненной на модели. Возмущающие скважины помещались последовательно в далеко отстоящие блоки с различной водопроводимостью и после каждого возмущения определялись параметры по множеству наблюдательных точек (табл. 33).

Таблица 33

| Вариант задачи | Водопроводимость возмущающего блока, м²/сутки | Крайние значения и средняя водопроводимость, м²/сутки | Крайние значения и средняя пьезопроводность, м²/сутки |
|---|---|---|---|
| 3а | 1000 | $\frac{240-300}{270}$ | $\frac{(1{,}6-6{,}2)\cdot 10^5}{3{,}0\cdot 10^5}$ |
| 3б | 3000 | $\frac{244-286}{258}$ | $\frac{(1{,}8-4{,}3)\cdot 10^5}{3{,}0\cdot 10^5}$ |
| 3в | 300 | $\frac{258-305}{275}$ | $\frac{(1{,}4-7{,}7)\cdot 10^5}{3{,}6\cdot 10^5}$ |

Результаты моделирования возмущения в пласте с эффективной неоднородностью могут быть полезны для разведочной практики. Однако необходимо показать, что основные выводы, сделанные по этим результатам, выходят за пределы частного эксперимента и имеют общий характер. Поэтому обратимся к данным полевых опытов. Из имеющегося в нашем распоряжении фактического материала отобраны опытные участки с различной и значительной степенью неоднородности, измеряемой среднеквадратическим логарифмов удельного дебита и коэффициентом вариации: $\sigma_{lg} = 0{,}29-1{,}29$; $W = 61-145\%$. Возмущение в пределах анализируемых участков производилось несколькими опытными кустами, области возмущения

которых радиусом не менее 1 км перекрывались частично или полностью. Исключение составляет лишь Урулюнгуйский участок, где области возмущения разобщены. Коэффициент водопроводимости определен способом временно́го прослеживания по пяти — восьми наблюдательным скважинам. При анализе изменчивости $km$ в пределах куста используется его среднеарифметическое и размах $R$ — разность между крайними значениями водопроводимости. Итоговой величиной является относительный размах. Результаты анализа сведены в табл. 34.

Таблица 34

| Участок, водоносный горизонт | Куст | Показатели неоднородности | | Водопроводимость | | Относительный размах $R/km_{ср}$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $\sigma_{lg}$ | $W$, % | $km_{ср}$, м²/сутки | размах $R$, м²/сутки | |
| Мийкайнар, трещинно-карстовый | 40 | 1,29 | 145 | 1180 | 142 | 12 |
| | 35 | 1,29 | 145 | 960 | 354 | 37 |
| Аймурза, слоистые пески | 205<br>210 | 0,77 | 118 | 320 | 142(29) | 44(9) |
| | 245<br>246 | 0,77 | 118 | 362 | 95 | 26 |
| Майлысай, пески | 54<br>55 | — | 120 | 980 | 192 | 19 |
| | 57 | — | 120 | 904 | — | |
| | 53 | — | 120 | 1078 | | |
| Урулюнгуй, слоистые гравийно-песчаные породы | 48<br>49 | 0,56 | 102 | 2280 | 890(420) | 39(18) |
| | 160<br>89 | 0,56 | 102 | 3490 | 775(680) | 22(19) |
| | 15 | 0,56 | 102 | 3780 | 980 | 26 |
| Левобережный, слоистые пески | 328 | 0,29 | 61 | 500 | 210 | 42 |
| Сухарыш, трещинно-карстовый | 102<br>57<br>72 | 0,29 | 119 | 635 | 183 | 29 |

Как видно, относительный размах величин $km$, полученных по данным временно́го прослеживания понижения, находится в пределах 12—44%, причем характерно отсутствие связи между величиной размаха и степенью неоднородности участка. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что имеющиеся различия в величинах водопроводимости не связаны с природой неоднородности. Действительно, анализ каждого объекта в отдельности показывает, что на участках Левобережный, Аймурзинский и Урулюнгуйский расхождения явились следствием несовершенства наблюдательных скважин в анизотропном разрезе. Кроме того, расхождения обусловлены погрешностями обработки. В частности, обработка с помощью комбинированных графиков, обеспечивающих более объективное осредне-

ние, существенно снижает величину размаха (цифры в скобках). Следовательно, с допустимым для практики приближением можно заключить, что в хаотически неоднородном пласте определяемые эффективные коэффициенты водопроводимости не зависят от местоположения наблюдательных скважин.

На примере участков Мийкайнар, Аймурза, Майлысай видно, что определяемые параметры практически не зависят и от местоположения возмущения, если смена местоположения происходит в общей области возмущения. Расхождения при смене возмущающих скважин не превышают 20%.

В практике опробования имеются также случаи, когда смена возмущающих скважин при тех же наблюдательных скважинах является причиной существенного и систематического изменения водопроводимости. Так, при разведке Ступинского водозабора (Московская область) смена возмущающих скважин приводила к двухкратному изменению водопроводимости. При этом размеры элементов неоднородности были соизмеримы с областью опробования. Но такая неоднородность не может квалифицироваться как эффективная.

Случаи, когда значения параметров, определенных по графикам временного прослеживания, оказываются зависимыми от положения возмущающей скважины, обычно характерны для безнапорных водоносных горизонтов, приуроченных к неравномерно-трещиноватым или закарстованным породам. Тогда зона квазистационарного режима, как правило, имеет очень небольшие размеры и область возмущения становится соизмеримой с элементами неоднородности. В то же время графики $S$ — $\lg t$ и в этих случаях внешне могут иметь прямолинейную форму, что может привести к неправильной квалификации определенных по этим графикам параметров как эффективных.

Величины коэффициента пьезопроводности зависят от конкретного местоположения точек съема информации, поэтому каждое частное значение, получаемое в одной точке, не является эффективным. При рассеянии значений коэффициента пьезопроводности эффективную его величину можно находить как среднеарифметическое из совокупности частных значений. Степень рассеяния величин пьезопроводности зависит от степени хаотической неоднородности. Так, в описанном примере при степени неоднородности $W = 190\%$ ($\sigma_{\lg} = 0{,}99$) значения пьезопроводности рассеяны в пределах одного порядка, среднеквадратическое логарифмов по выборке из 65 значений равно $\sigma_{\lg} = 0{,}288$. По этим данным видно, что при максимальной степени неоднородности рассеяние пьезопроводности не слишком велико. Практически при коэффициенте вариации до 100% рассеяние величин пьезопроводности настолько незначительно, что совокупность комбинированных графиков представляется одной прямой (см. рис. 20). Тогда ($W < 100\%$) каждое частное значение близко эффективному коэффициенту.

Таким образом, необходимость осреднения коэффициентов пьезопроводности, рассеянных за счет хаотической неоднородности,

возникает только в весьма неоднородных и крайне неоднородных пластах ($W > 100\%$). При этом эффективная пьезопроводность (уровнепроводность) рассчитывается как среднеарифметическое.

### Определение параметров способом площадного прослеживания

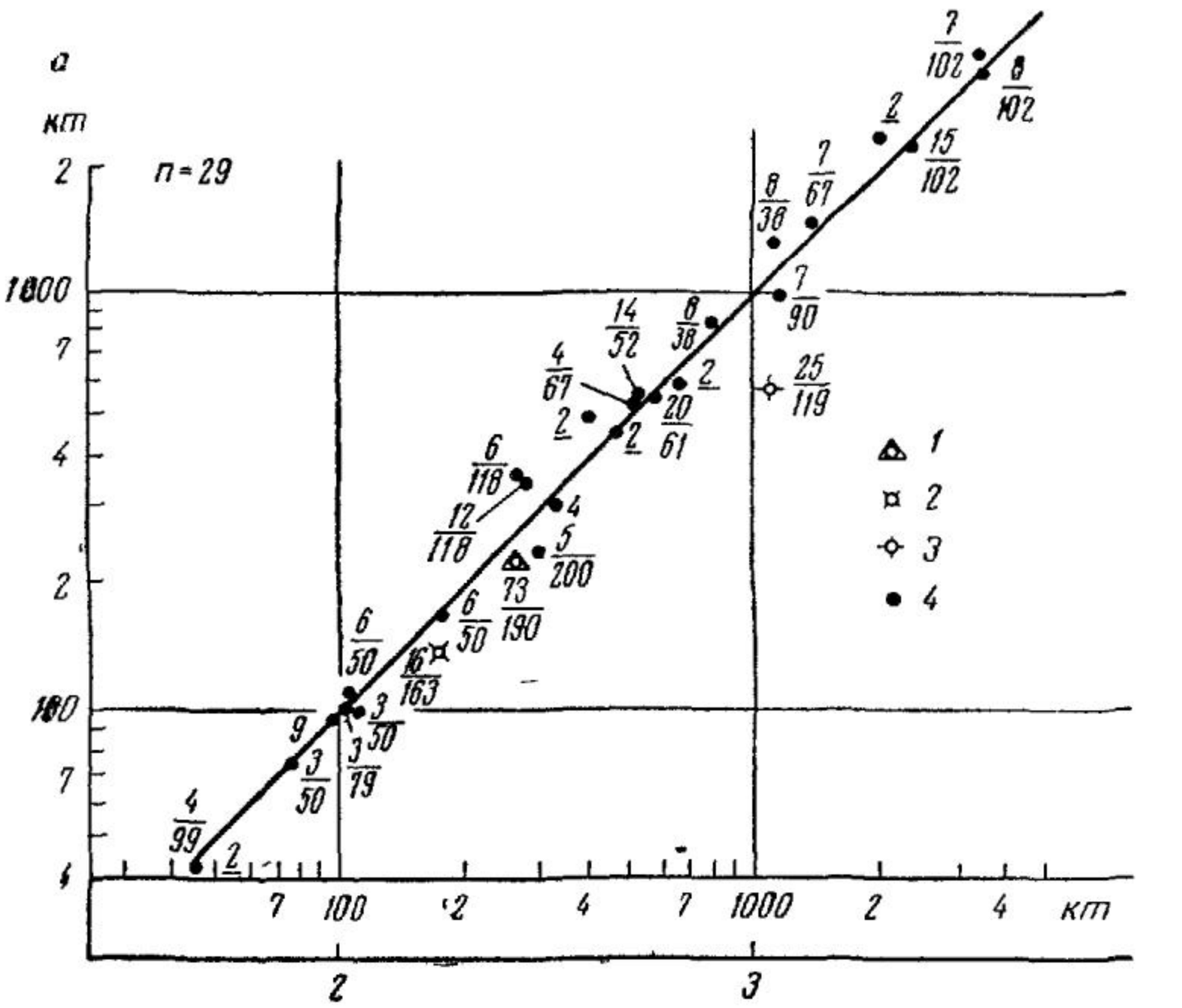
Площадные закономерности изменения уровня в хаотически неоднородных пластах являются корреляционными. Из этого следует, что эффективные параметры этим способом можно определить, строго говоря, лишь приближенно. Для определений необходима некоторая выборка значений понижения, фиксируемых на разных расстояниях от возмущающей скважины. Величина выборки и степень приближения определяемых параметров к эффективным будут зависеть от силы корреляционной связи. В свою очередь последняя зависит от степени хаотической неоднородности. Проследим характер этой зависимости на конкретных примерах. С этой целью выбраны такие опытные участки, на которых область кустового опробования была соизмеримой с площадью одиночного опробования кратковременного возмущения. По результатам одиночного опробования определен коэффициент вариации, характеризующий степень неоднородности, а по результатам кустового — коэффициент корреляции графиков площадного прослеживания. Затем построен график $r_{x,\,y} = f(W)$ (рис. 70).

Зависимость между анализируемыми величинами заметна. Она выражается в уменьшении коэффициента корреляции с увеличением коэффициента вариации. По имеющимся примерам можно установить, что в реальных условиях, если хаотическая неоднородность является единственным фактором аномальности площадных графиков, коэффициент корреляции изменяется в пределах $r_{x,\,y} = 0{,}75—0{,}99$. В ряде случаев, как, например, в точке «Л», эффект естественной хаотической неоднородности может быть усилен конструктивными особенностями наблюдательных скважин. В данном случае точка смещена из-за неравномерного оборудования фильтрами слоистой толщи.

Для основных групп водоносных горизонтов, выделенных по степени неоднородности, характерны следующие значения коэффициента корреляции:

| | $W$ | $r_{x,\,y}$ |
|---|---|---|
| однородные | $< 40$ | 0,99—0,95 |
| неоднородные | 40—80 | 0,95—0,90 |
| весьма неоднородные | 80—150 | 0,90—0,80 |
| крайне неоднородные | $>150$ | $<0{,}8$ |

Примеры графиков площадного прослеживания с различными коэффициентами корреляции можно видеть на рис. 3,23. Как показывает анализ опытных графиков площадного прослеживания, корреляционная зависимость понижения от логарифма расстояния является весьма тесной. Но нельзя основываться на единичных



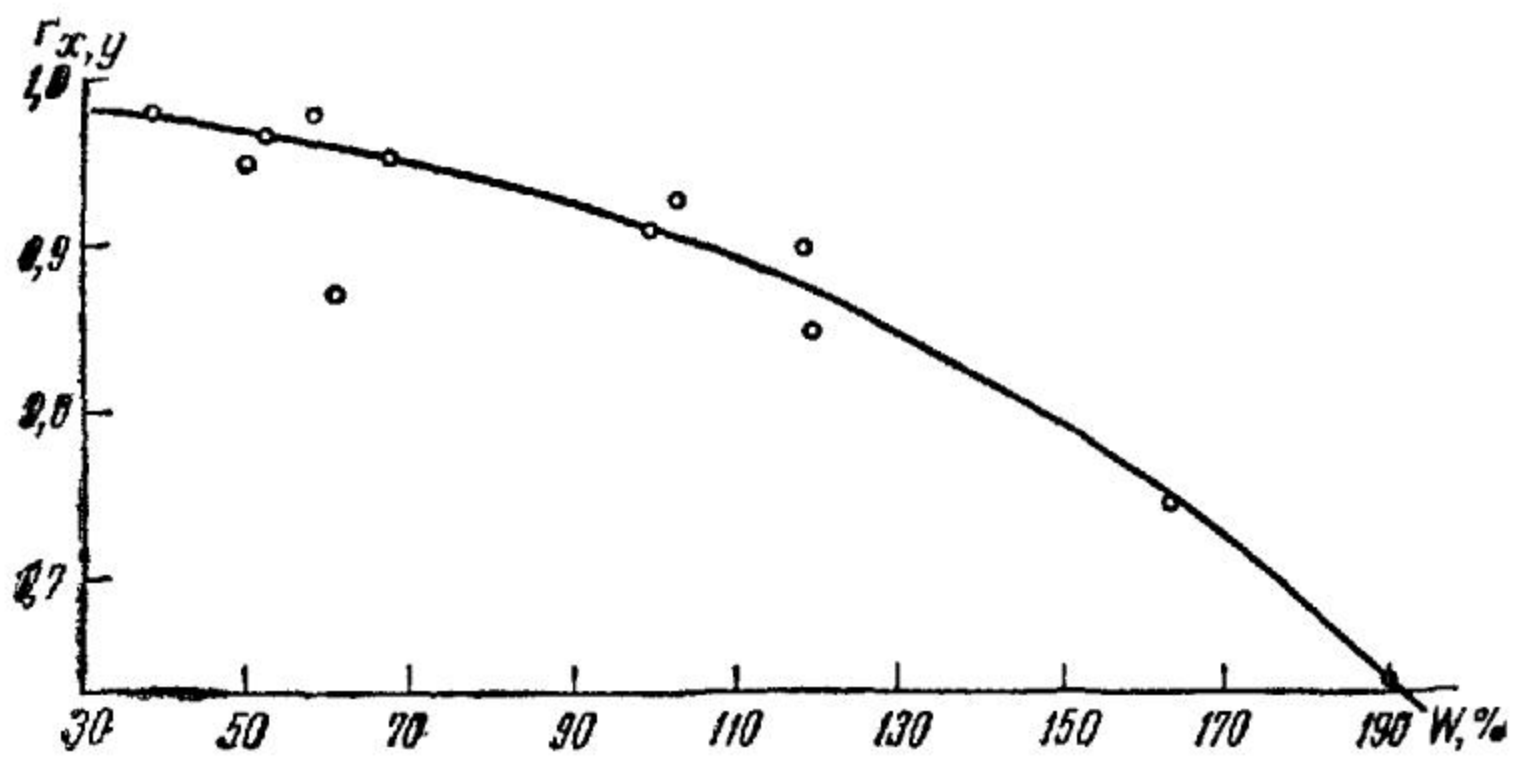




Рис. 70. Сравнение величин коэффициента водопроводимости, полученных двумя способами обработки (*а*), и график зависимости коэффициента корреляции от коэффициента вариации (*б*):

*1* — по данным моделирования; *2* — по данным эксплуатации, *3* — по данным пробно-эксплуатационных откачек; *4* — по данным опытных откачек и выпусков Цифры в числителе — количество наблюдательных скважин, в знаменателе — коэффициент вариации водопроводимости в пределах участка опробования

замерах, необходима выборка значений по нескольким наблюдательным скважинам. Для практики очень важно знать необходимое количество наблюдательных скважин. Количество наблюдательных скважин зависит от группы водоносных горизонтов по степени неоднородности, согласно предложенной классификации. Для однородных водоносных пластов, характеризующихся степенью неоднородности $W \leqslant 40\%$ и силой корреляционной связи площадных графиков 0,99—0,95, количество наблюдательных скважин должно быть минимальным. Исходя из имеющихся примеров можно рекомендовать 2—3 наблюдательные скважины.

В описанном ранее примере, полученном И. С. Пашковским на модели для случая $W = 50\%$, ошибка в определении коэффициента водопроводимости по формуле Дюпюи по двум наблюдательным скважинам достигает 50% [94]. Следовательно, возможность ограничиваться двумя наблюдательными скважинами в опытном кусте распространяется на водоносные горизонты, характеризующиеся коэффициентом вариации $W \leqslant 30—40\%$, т. е. для однородных пластов. В остальных случаях необходимо не менее трех наблюдательных скважин.

Для неоднородных водоносных пластов, характеризующихся степенью хаотической неоднородности $W = 40—80\%$ и силой корреляционной связи площадных графиков $r_{x,\,y} = 0{,}95—0{,}9$, количество наблюдательных скважин может быть равным трем-четырем.

Для весьма неоднородных водоносных пластов, характеризующихся степенью неоднородности $W = 80—150\%$ и силой корреляционной связи $r_{x,\,y} = 0{,}9—0{,}8$, количество наблюдательных скважин должно быть наибольшим и примерно равно пяти — десяти.

В крайне неоднородных пластах, характеризующихся степенью неоднородности $W > 150\%$ и силой корреляционной связи $r_{x,\,y} < 0{,}8$, определение параметров с необходимой достоверностью (расхождение с эффективными параметрами меньше 25%) мало вероятно, так как для этого требуется нереально большая выборка при продолжительности опытного возмущения больше практикуемой.

Последний вывод можно иллюстрировать графиком зависимости ошибок определения водопроводимости и пьезопроводности от коэффициента корреляции (рис. 71). Графики построены по результатам моделирования, условия которого описаны в разделах 2, 3. Параметры определялись по графикам площадного прослеживания через коэффициент линейной регрессии. Как видно на графике, при достаточно больших выборках, получаемых в зоне квазистационарного режима за время, соизмеримое с практикуемой длительностью возмущения, погрешности в сторону завышения обоих параметров при $r_{x,\,y} = 0{,}75—0{,}5$ весьма существенны: $\Delta km = 20—25\%$, $\Delta a = 60—155\%$.

Таким образом, исход интерпретации опытных данных способом площадного прослеживания зависит от степени хаотической неоднородности. В определенных пределах, объединяющих однородные, неоднородные и даже весьма неоднородные водоносные пласты, па-

раметры, определяемые этим способом, вполне достоверны при практикуемом количестве наблюдательных скважин. На графике рассеяния (см. рис. 70) сравниваются значения коэффициента водопроводимости, определенные способом временного (комбинированного) и площадного прослеживания для 29 опытных кустов. Кустовое опробование произведено в широком диапазоне водопроводимости (4 — 3500 м²/сутки) и степени ее неоднородности ($W$ = 30—163%) при различном количестве наблюдательных скважин (2—25). Как видно, достаточно тесное положение точек около средней линии свидетельствует об удовлетворительной сходимости параметров, рассчитанных обоими способами. Наибольшие отклонения характерны для точек, представляющих участки с коэффициентом вариации $W > 100\%$ ($W$ = 118, 119, 163, 190). В этих случаях расхождения имеют место даже при большом количестве наблюдательных скважин и длительном возмущении.

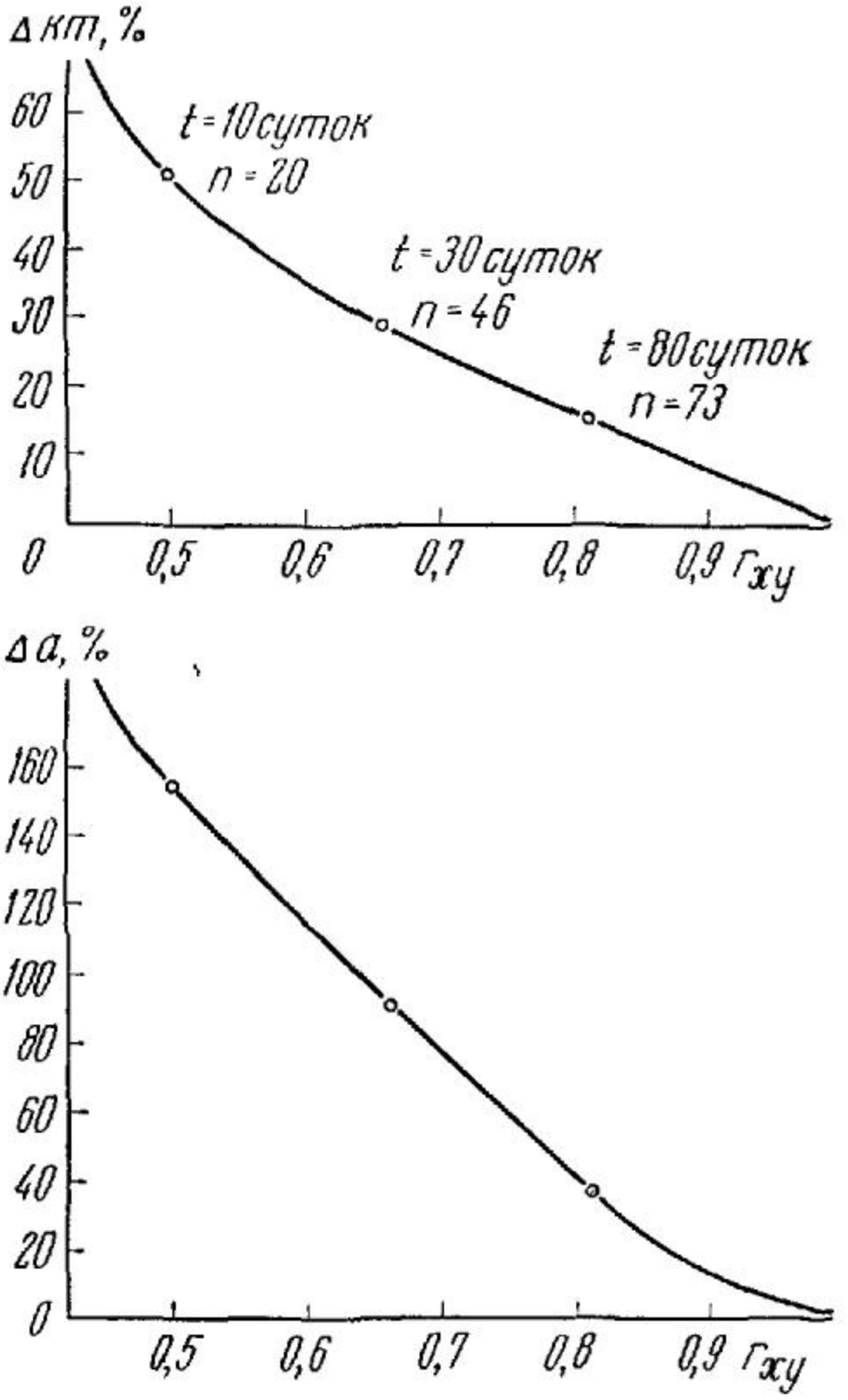



Рис. 71. Зависимость ошибки определения коэффициентов водопроводимости и пьезопроводности, определяемых способом площадного прослеживания, от длительности откачки и коэффициента корреляции (условия см. на рис. 67).

| $t$, сутки | $n$ | $r_{xy}$ | $km$, м²/сутки | $a$, м²/сутки |
|---|---|---|---|---|
| 10 | 20 | −0,5 | 340 | $5{,}6 \cdot 10^5$ |
| 30 | 46 | −0,66 | 290 | $4{,}2 \cdot 10^5$ |
| 80 | 73 | −0,82 | 263 | $2{,}9 \cdot 10^5$ |

Таким образом, в указанных пределах можно пользоваться способом площадного прослеживания для получения достоверных значений эффективных параметров. Существенно в этом отношении и то, что сам вид площадного графика прослеживания дает представление о возможности дальнейшей обработки. При малом количестве точек и их тесном линейном положении осреднение производят на глаз, при большом количестве точек и их равномерном рассеянии обработку следует производить через коэффициент линейной регрессии. Аномальные точки следует отбраковывать мотивированно.

## 5. КВАЛИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ХАОТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОГО ПЛАСТА

Для использования гидрогеологических параметров в прогнозном расчете важно знать, какую область пласта они характеризуют или в какой степени отражают неоднородность испытуемого пласта. Это зависит от характера неоднородности. Как уже говорилось, при опробовании водоносных пластов приходится иметь дело с эффективной неоднородностью и неоднородностью низшего порядка. Закономерности изменения уровня в хаотически неоднородном пласте определяются эффективными параметрами. Таким образом, если мы имеем дело с элементами эффективной неоднородности, а полученные параметры являются действительно эффективными, то они могут быть использованы в прогнозном расчете для всего фильтрационного поля, независимо от его размеров и степени неоднородности.

Однако, как показывает анализ данных опытных откачек и результаты моделирования, в конкретных условиях вполне реально, что даже при длительном возмущении размеры элементов неоднородности соизмеримы с размерами области возмущения. Особенно это характерно для безнапорных горизонтов. При этом параметры, определяемые по графикам $S - \lg t$ и $S - \lg r$, уже не являются эффективными и их нельзя распространять на всю область эксплуатационного возмущения при прогнозном расчете.

Вопрос о соизмеримости размеров элементов неоднородности с размерами области возмущения и тем самым о характере неоднородности для водоносных горизонтов, приуроченных к рыхлым и равномерно трещиноватым отложениям, особенно в напорных условиях, может быть решен на основании анализа геологического строения исследуемого месторождения подземных вод (наличие или отсутствие границ водоносного горизонта в плане и т. д.).

В то же время для горизонтов, приуроченных к неравномерно трещиноватым и закарстованным породам, особенно при безнапорном режиме фильтрации, характер неоднородности может быть определен практически только по результатам опытных работ (путем сопоставления параметров, определяемых при различном местоположении опытных скважин). Поэтому квалификация фильтрационной неоднородности должна рассматриваться как важная составная часть разведочных работ, сам объем которых и, в частности, количество кустовых опытов, зависит от характера и степени неоднородности. Приведенный анализ позволяет сделать некоторые выводы о возможности применения различных методов оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Для однородных водоносных горизонтов ($\sigma_{\lg} < 0{,}2$) наиболее целесообразен гидродинамический метод оценки, так как в этом случае расчетное значение параметров может быть определено по небольшому количеству скважин. При этом, как уже указывалось, в качестве расчетного значения даже при логарифмически нормальном законе распределения может приниматься сред-

неарифметическое значение, поскольку оно практически не отличается от среднелогарифмического. В условиях неоднородных пластов ($\sigma_{lg} = 0{,}2$—$0{,}4$) также может применяться гидродинамический метод или гидродинамический метод в сочетании с гидравлическим, но при $\sigma_{lg} > 0{,}3$, в качестве расчетного следует принимать среднегеометрическое значение параметра.

Для весьма неоднородных и крайне неоднородных водоносных горизонтов гидродинамический метод (самостоятельно или в сочетании с гидравлическим) можно применять только в тех случаях, когда неоднородность является эффективной, и найденные эффективные значения параметров могут быть распространены на всю область эксплуатационного возмущения. Однако для этого в целом ряде случаев необходимо проведение очень большого объема буровых и опытных работ, поэтому здесь наиболее целесообразен гидравлический метод. Но применение гидродинамического метода не исключено и в весьма неоднородных породах.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы относительно опробования и обработки опытных данных применительно к неоднородным водоносным пластам.

1. Фильтрационная неоднородность с точки зрения длительности возмущения является понятием относительным. Характер неоднородности определяется относительными (по отношению к размерам области возмущения) размерами элементов неоднородности. По характеру деформации опытных закономерностей изменения уровня целесообразно различать эффективную неоднородность и неоднородность низшего порядка (по М. В. Рацу).

2. В условиях эффективной неоднородности временные закономерности изменения уровня сохраняются функциональными, а площадные — переходят в корреляционные. По опытным данным установлена зависимость силы корреляционной связи ($r_{x,y}$) от степени неоднородности ($W$).

3. В условиях неоднородности низшего порядка сохраняются функциональными и временные, и площадные закономерности изменения уровня, но временные закономерности с течением времени изменяют вид функциональной зависимости; деформации площадных закономерностей менее заметны и имеют место на участках в периферийных частях депрессии ($r > 0{,}5\ l$). Для площадных закономерностей характерны параллельные смещения графиков, построенных на поздние моменты времени.

4. В условиях эффективной неоднородности определяемые способом временно́го (комбинированного) прослеживания параметры являются гидродинамически эффективными. Необходимость осреднения получаемых величин существует только в отношении коэффициента пьезопроводности (уровнепроводности) в весьма неоднородных и крайне неоднородных средах ($W > 80\%$). Эффективный коэффициент пьезопроводности можно определять на основе среднеарифметического.

Определение эффективных параметров способом площадного прослеживания возможно по нескольким наблюдательным скважинам, число которых зависит от степени неоднородности. Возможность определения эффективных параметров по формуле Дюпюи по двум наблюдательным скважинам ограничивается однородными водоносными горизонтами ($W < 30\% - 40\%$).

5. В связи с тем что в реальных условиях эффективные значения параметров даже при длительном возмущении могут быть определены далеко не во всех случаях (особенно для безнапорных горизонтов), необходимо по данным опытных работ определять характер и степень неоднородности и в соответствии с полученными результатами выбирать метод оценки эксплуатационных запасов подземных вод и расчетные параметры для прогноза.

Глава 11

# УЧЕТ ЕСТЕСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

Анализ результатов опытных откачек показывает, что естественные колебания уровней подземных вод могут существенно влиять на величину понижения и темп его изменения во времени.

Можно выделить следующие основные виды естественных колебаний уровня, не зависящие от проведения опыта: 1) под влиянием изменения барометрического давления; 2) под влиянием изменения интенсивности питания водоносного горизонта атмосферными осадками; 3) под влиянием подъемов и спадов уровня в поверхностных водоемах и водотоках. Такие колебания в течение всего опыта могут носить направленный, ритмический или синусоидальный характер.

При обработке результатов опытных откачек и расчетах гидрогеологических параметров эти колебания, как правило, не учитываются. Между тем величина и скорость их изменения за время откачки (особенно в сильно трещиноватых пластах, обладающих высокими фильтрационными свойствами) часто вполне соизмеримы с понижениями уровня (в наблюдательных скважинах) и темпом его снижения в скважинах при опытных откачках. Поэтому неучет естественных колебаний уровня может приводить к существенному искажению результатов, получаемых при расчетах параметров и анализе гидрогеологических условий участка опытного куста.

Только в последние годы в отечественных и зарубежных работах [13, 166] появились некоторые рекомендации по учету естественных колебаний уровня при обработке результатов опытных откачек, что связано с развитием интерпретационного направления при анализе опытных откачек.

Когда под влиянием естественных колебаний уровней подземных вод темп их изменения в скважинах в процессе откачек оказывается больше или меньше вызываемого фактическим водоотбором, происходит деформация хронологических графиков изменения уровня, особенно если они построены в полулогарифмическом масштабе, а также искажение абсолютной величины понижения.

Основные ошибки при анализе результатов опытных работ и расчете гидрогеологических параметров возникают в результате следующих причин:

1) изменяется угол наклона прямолинейной части временных графиков прослеживания уровня, что по форме графиков не обнаруживается и приводит к завышению или занижению рассчитанных значений гидрогеологических параметров;

2) изменяется функциональный характер графиков прослеживания уровня, что приводит к неверным выводам о гидрогеологических условиях опытного участка;

3) делается ложный вывод о наличии или отсутствии стабилизации уровня в процессе опытных откачек;

4) на графиках прослеживания уровня возникают ложные положительные или отрицательные аномалии;

5) происходит полная деформация графиков прослеживания уровней; они становятся практически неинтерпретируемыми и отбраковываются.

Для исключения этих ошибок необходимо учитывать естественные колебания уровней подземных вод путем введения соответствующих поправок в замеренные понижения уровня.

Такие поправки целесообразнее всего получать по данным установленных при естественном режиме соответствующих корреляционных зависимостей между закономерностями изменения уровня в расчетных наблюдательных скважинах и изменением барометрического давления, уровня в реке, уровня в эталонной режимной скважине и т. п.

После установления корреляционной зависимости поправки за счет естественных колебаний уровня в процессе откачки могут быть рассчитаны при условии продолжения измерений соответствующего показателя, положенного в основу построения корреляционной связи.

## 1. КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Колебания уровня под влиянием изменения барометрического давления обычно наиболее существенно проявляются в напорных водоносных горизонтах, достигая нескольких десятков сантиметров [35]. В ряде случаев отмечаются колебания с амплитудой до 20—25 см и в безнапорных водоносных горизонтах трещинно-карстового и трещинного типа. Они проявляются в виде гармонических или незакономерных колебаний уровня при достаточно длительных откачках, либо в виде направленного изменения темпа их снижения при кратковременных.

Так, например, при производстве разведочных работ на Пожняель-Седьюском месторождении подземных вод в трещинно-карстовом водоносном горизонте напорно-безнапорного типа при ряде опытных откачек по наблюдательным скважинам были получены графики прослеживания уровня настолько деформированные, что их практически нельзя было интерпретировать (рис. 72). Деформация графиков была обусловлена влиянием колебаний атмосферного

давления. В другом случае на этом же объекте в процессе трехсуточной откачки происходило постепенное уменьшение атмосферного давления, вследствие чего график прослеживания уровня оказался выположенным. В результате коэффициент водопроводимости в этой скважине был определен со значительным завышением (2600 м²/сутки против 1500 м²/сутки при повторной откачке в период устойчивого атмосферного давления).

Учет колебаний атмосферного давления может быть произведен путем определения барометрической эффективности [35, 69] водоносного горизонта. Если барометрическая эффективность достаточно высока, при обработке результатов опытных откачек предварительно следует вычислить приведенные величины понижения уровня с учетом поправки на изменение барометрического давления. Знак поправки принимается положительным при уменьшении атмосферного давления и отрицательным при его увеличении, так как увеличение атмосферного давления вызывает снижение уровня воды, а уменьшение — повышение.

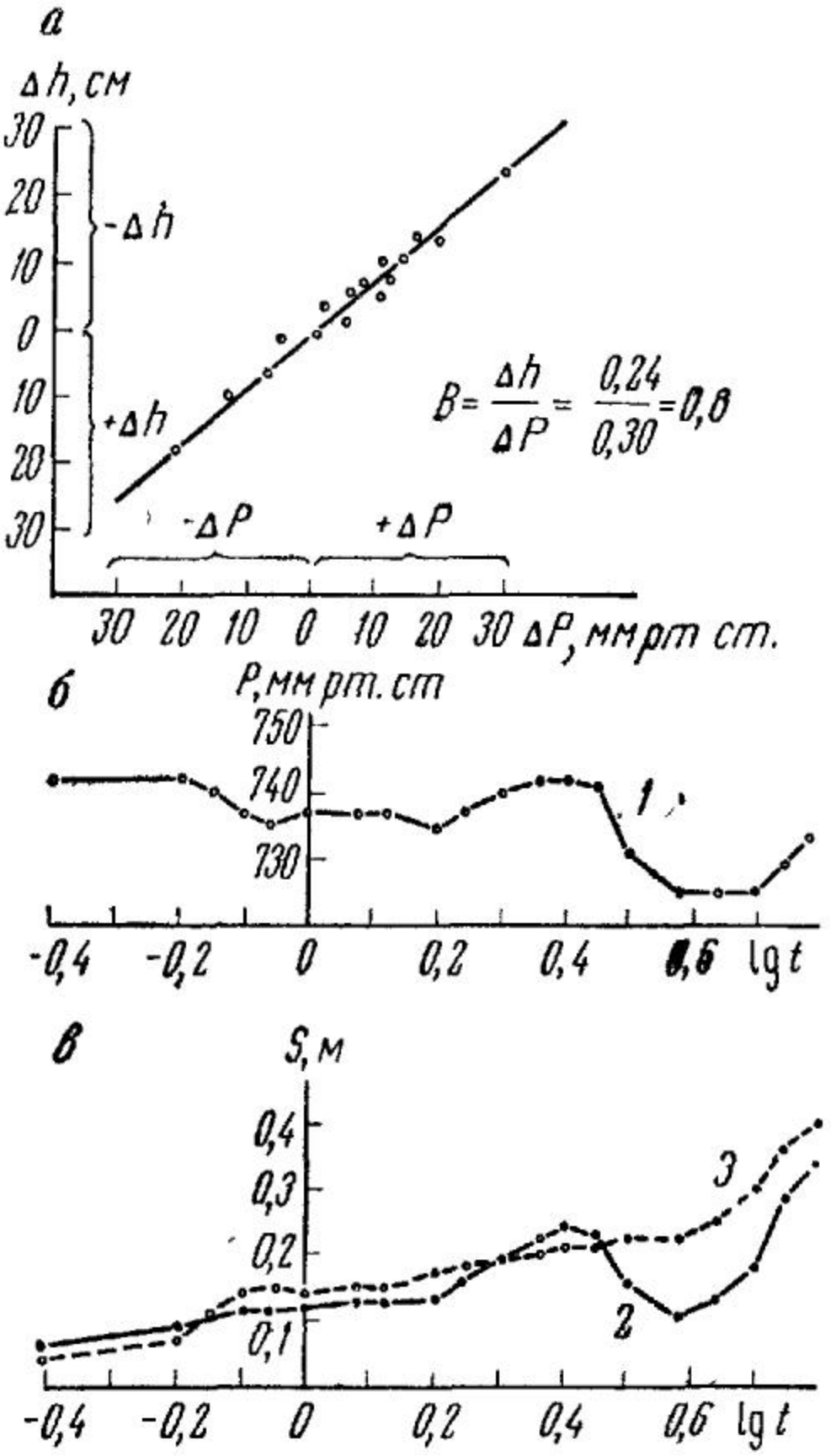



Рис. 72. Графики зависимости колебаний уровня подземных вод от изменения атмосферного давления (*а*), прослеживания колебаний атмосферного давления (*б*) и понижения уровня (*в*) при опытной откачке (Тиман, 1966 г.).

*1* — атмосферное давление; *2* — замеренные понижения; *3* — исправленные понижения

Чтобы получить поправку к величине понижения уровня воды в скважине, следует вычислить для каждой наблюдательной скважины ее барометрический коэффициент *. Для этого в течение некоторого периода перед откачкой в каждой скважине производятся систематические замеры уровней и одновременно измеряется

---

* Методика определения барометрического коэффициента изложена, например, в работах [35, 69]. В них приводится также методика определения параметров водоносного горизонта по барометрической эффективности.

барометрическое давление (период таких наблюдений должен определяться характером и амплитудой изменения барометрического давления). Затем по каждой из них строится график зависимости величины изменения уровня $\Delta h$ от величины изменения атмосферного давления $\Delta P$, по которому определяется барометрический коэффициент $B = \frac{\Delta h}{\Delta P}$ (см. рис. 72, *а*). Продолжая затем в процессе откачки систематические измерения барометрического давления, на каждый момент времени (см. рис. 72, *б*), можно вычислить поправку к величине понижения уровня по формуле

$$\Delta S^* = \Delta S \pm B\,\Delta P_{t_n - t_{n-1}}, \tag{11.1}$$

где $\Delta S^*$ и $\Delta S$ — соответственно, приведенная и замеренная величины приращения понижения уровня за период времени от момента предыдущего замера $t_{n-1}$ до момента текущего замера $t_n$;

$\Delta P_{t_n - t_{n-1}}$ — величина изменения атмосферного давления за этот же период.

Приведенная величина понижения уровня $S^*_{t_n}$ на момент времени $t_n$ определяется по формуле

$$S^*_{t_n} = S^*_{t_{n-1}} \pm \Delta S^*_{t_n - t_{n-1}},$$

или

$$S^*_{t_n} = S_{t_n} + \left( \sum_1^n \Delta S^* - \sum_1^n \Delta S \right). \tag{11.2}$$

Рассмотрим пример определения поправки к величине понижения за счет колебаний барометрического давления. На рис. 72, *в* приведен график прослеживания понижения уровня $S$ — $\lg t$ по наблюдательной скважине 69 при опытной откачке из скважины 6 в Ухтинском районе из закарстованных доломитов, совмещенный с графиком колебаний атмосферного давления. Под влиянием этих колебаний график деформирован настолько, что его интерпретация невозможна. Наблюдения за изменением атмосферного давления и замеры уровней воды в наблюдательных скважинах производились до начала откачки в течение 6 суток, что позволило определить барометрический коэффициент скважины 69, который оказался равным 0,8 (см. рис. 72). Затем была вычислена поправка и приведенная величина понижения уровня. Порядок расчета приведенных понижений показан в табл. 35. При вычислении поправки за нулевую величину было принято атмосферное давление при пуске откачки 740 мм. Контролем правильности введения поправки служат те точки, в которых атмосферное давление равно начальному. В этих точках величины приведенного и замеренного понижения уровня равны между собой.

График прослеживания уровня, построенный по рассчитанным величинам приведенных понижений, представлен на рис. 72, *в*.

Таблица 3

| Дата замера | Время замера $t$ | $S$, м | $P$, мм | $\Delta P$, м | $B \cdot \Delta P$, м | $\Delta S$, м | $\Delta S^*$, м | $S^*$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Откачка из скважины 6 $Q = 20$ л/сек | | | | | | | | |
| Начало откачки в $13^{00}$ 17/IX 1966 г. $P_0 = 740$ мм | | | | | | | | |
| 17/IX | 22 | 0,06 | 742 | —0,02 | —0,02 | +0,06 | +0,04 | 0,04 |
| 18/IX | 4 | 0,09 | 742 | 0,0 | 0,0 | +0,03 | +0,03 | 0,07 |
| | 6 | 0,11 | 740 | +0,02 | +0,02 | +0,02 | +0,04 | 0,11 |
| | 8 | 0,12 | 737 | +0,03 | +0,02 | +0,01 | +0,03 | 0,14 |
| | 10 | 0,11 | 735 | +0,02 | +0,02 | —0,01 | +0,01 | 0,15 |
| | 13 | 0,12 | 737 | —0,02 | —0,02 | +0,01 | —0 01 | 0,14 |
| | 18 | 0,13 | 737 | 0,0 | — | +0,01 | +0,01 | 0,15 |
| | 21 | 0,13 | 737 | 0,0 | — | 0,00 | 0,0 | 0,15 |
| 19/IX | 3 | 0,13 | 735 | +0,02 | +0,02 | 0,00 | +0,02 | 0,17 |
| | 7 | 0,16 | 737 | —0,02 | —0,02 | +0,03 | +0,01 | 0,18 |
| | 13 | 0,19 | 740 | —0,03 | —0,02 | +0,03 | +0,01 | 0,19 |
| | 20 | 0,22 | 742 | —0,02 | —0,02 | +0,03 | +0,01 | 0,20 |
| 20/IX | 1 | 0,23 | 742 | 0,00 | 0,00 | +0,01 | +0,01 | 0,21 |
| | 9 | 0,23 | 741 | +0,01 | +0,01 | —0,01 | 0,00 | 0,22 |
| | 17 | 0,15 | 731 | +0,10 | +0,08 | —0,08 | 0,00 | 0,22 |
| 21/IX | 9 | 0,11 | 725 | +0,06 | +0,05 | —0,04 | 0,00 | 0,23 |
| | 21 | 0,13 | 725 | 0,00 | 0,00 | +0,03 | +0,03 | 0,25 |
| 22/IX | 13 | 0,18 | 725 | 0,00 | 0,00 | +0,05 | +0,05 | 0,30 |
| 23/IX | 1 | 0,28 | 729 | —0,04 | —0,03 | +0,10 | +0,07 | 0,37 |
| | 13 | 0,34 | 733 | —0,04 | —0,03 | +0,06 | +0,03 | 0,40 |

Как видно, деформация графика почти полностью устранена (отклонение вверх на конечном участке вызвано влиянием слабопроницаемого контура). Полученный график позволил рассчитать величину коэффициента водопроводимости, который составил 1580 м²/сутки, что соответствует результатам определений по другим кустовым откачкам, проведенным на этом участке в период относительно устойчивого барометрического давления.

## 2. КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПИТАНИЯ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ

Колебания уровней при изменении интенсивности питания водоносных горизонтов атмосферными осадками (в частности при инфильтрации дождевых и талых вод или меженном падении уровня) также часто проявляются в процессе опытных и опытно-эксплуатационных откачек и могут существенно отражаться на их результатах. По сравнению с колебаниями уровней под влиянием изменения барометрического давления они носят во времени более плавный и направленный характер. Влияние этих колебаний проявляется, как правило, в виде увеличения или уменьшения темпа снижения уровня при откачках по сравнению с тем, который должен определяться только действием водоотбора.

Параметры, рассчитанные по данным разновременных откачек из одной и той же скважины, связаны с естественными колебáниями уровня и зависят от времени проведения опыта.

Так на Пожняель-Седьюском месторождении была дважды проведена откачка из скважины 52 в период естественного подъема уровня при снеготаянии и в период его относительно стабильного положения. Рассчитанные по данным этих откачек значения коэффициента водопроводимости составили, соответственно, 3890 и 1900 м²/сутки, т. е. в первом случае вследствие подъема уровня он оказался в 2 раза больше.

Обычно откачки проводятся в меженные периоды. Поэтому более часто в процессе откачек происходит естественный спад уровней, что приводит к существенному занижению коэффициентов водопроводимости. Особенно сильно процесс естественного спада уровней проявляется при длительных откачках, когда его темп становится соизмеримым или даже превышает темп снижения уровня под влиянием откачки воды, либо все снижение уровня обусловлено только естественным спадом. В последнем случае часто делаются совершенно неверные выводы о характере режима движения подземных вод, обусловленного влиянием откачки.

При обработке материалов опытных и опытно-эксплуатационных откачек поправка за счет колебаний уровня под влиянием изменения интенсивности питания водоносного горизонта атмосферными осадками, может быть введена аналогично поправке за счет изменения барометрического давления.

Для введения поправки наиболее целесообразно использовать метод парной корреляции. Для этого на участке должна быть выбрана эталонная скважина, которая не будет находиться в зоне влияния откачки. В этой скважине и в скважинах опытного куста естественные колебания уровней воды должны определяться одними и теми же причинами, что позволит установить между ними тесную корреляционную связь. Для установления такой связи необходим более длительный цикл наблюдений, чем при определении барометрического коэффициента скважины, так как колебания уровня под влиянием изменения интенсивности питания водоносного горизонта носят более плавный характер и проявляются во времени медленнее. Чтобы корреляционная связь была корректной, наблюдения за колебаниями уровня в опытной и эталонной скважинах должны охватывать период, когда они носят такой же характер, как и в процессе проведения откачки, и характеризовать по возможности большую величину изменения уровня. Систематические замеры уровня в этих скважинах следует начинать до начала откачки. Во избежание задержки проведения опытных работ в случае необходимости эти наблюдения должны быть продолжены и после откачки до получения необходимых материалов. Затем для каждой скважины опытного куста строится график связи колебаний уровня в ней $\Delta h$ с колебаниями уровня в эталонной скважине $\Delta h_э$. Он обычно имеет прямолинейную форму. Пример такого графика, построенного для двух

скважин в Ухтинском районе, приведен на рис. 73. По полученному графику определяется режимный коэффициент $R$ для каждой скважины куста по отношению к эталонной скважине $\left(R = \frac{\Delta h}{\Delta h_э}\right)$.

Проводя в процессе откачки систематические замеры уровня в эталонной скважине, можно вычислить для каждого момента откачки поправку к величине понижения уровня по формуле

$$\Delta S^* = \Delta S \pm R\,(\Delta h_э)_{t_n - t_{n-1}}, \qquad (11.3)$$

где $(\Delta h_э)_{t_n - t_{n-1}}$ — величина изменения уровня в эталонной скважине за период от момента времени $t_{n-1}$ до момента времени $t_n$.

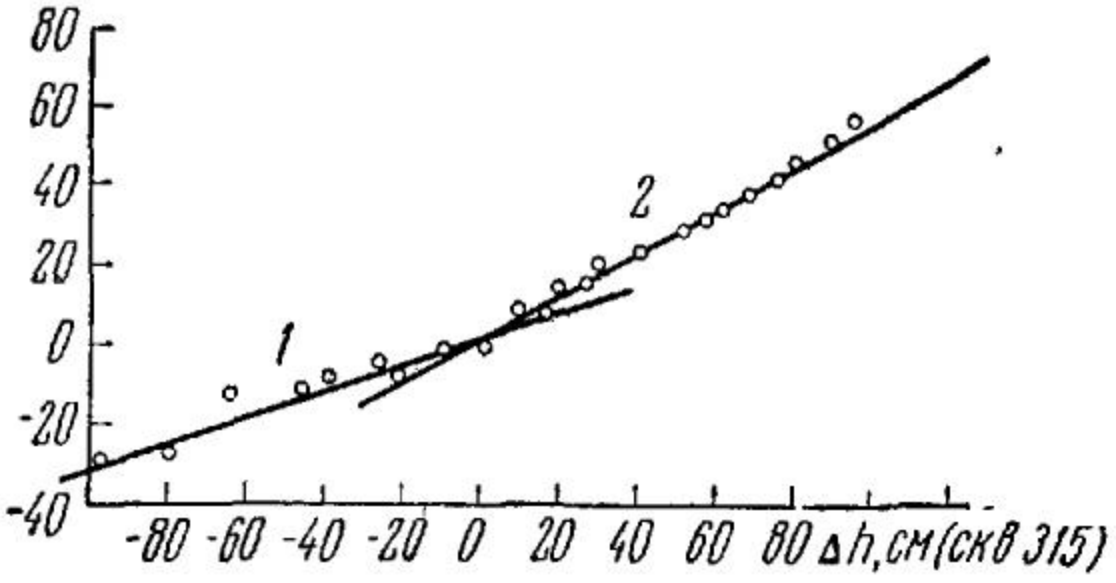



Рис. 73. Корреляционный график естественных колебаний уровня в скважинах 315 и 331 (Тиман, 1966 г.).

*1* — ветвь подъема $R_п = \frac{\Delta h\ 331}{\Delta h\ 315} = \frac{30}{100} = 0{,}3$; *2* — ветвь спада $R_{сп} = \frac{\Delta h\ 331}{\Delta h\ 315} = \frac{52}{100} = 0{,}52$

Вычисление величины приведенного понижения производится так же, как и при учете колебаний барометрического давления.

Следует отметить, что в периоды спада и подъема уровня величины режимного коэффициента, полученного по одним и тем же скважинам, в отдельных случаях могут отличаться. Это связано с тем, что разница интенсивности изменения уровня при спаде будет определяться свойствами водоносного горизонта, а при подъеме весьма существенную роль будут играть различия в глубине залегания уровня и строении зоны аэрации. По этим же причинам может происходить некоторое запаздывание начала подъема или спада уровня в одной скважине по сравнению с другой на интервал времени $\Delta t$. Интервал запаздывания может быть определен графически. Для этого следует произвести сдвиг графика колебаний уровня во времени в эталонной и опытной скважинах до совмещения абсцисс их экстремумов. Вычисление поправки к величине понижения уровня при откачке в этих случаях следует производить с учетом полученного интервала запаздывания:

$$\Delta S^*_{t_n - t_{n-1}} = \Delta S_{t_n - t_{n-1}} \pm R\,(\Delta h_э)_{(t_n - \Delta t) - (t_{n-1} - \Delta t)}. \qquad (11.4)$$

При естественном дренаже в выражении (11.4) принимается знак минус, при питании — плюс.

Однако предложенный способ не всегда может быть применен, поскольку для установления корреляционной связи требуется

достаточно длительный цикл наблюдений; не всегда также можно подобрать эталонную скважину, находящуюся в сходных гидрогеологических условиях. Поэтому в ряде случаев при направленном естественном изменении уровня могут быть использованы более простые способы введения поправок.

При относительно однородном строении участка при отсутствии данных для построения корреляционного графика естественный спад уровня может быть учтен прямым переносом скорости снижения

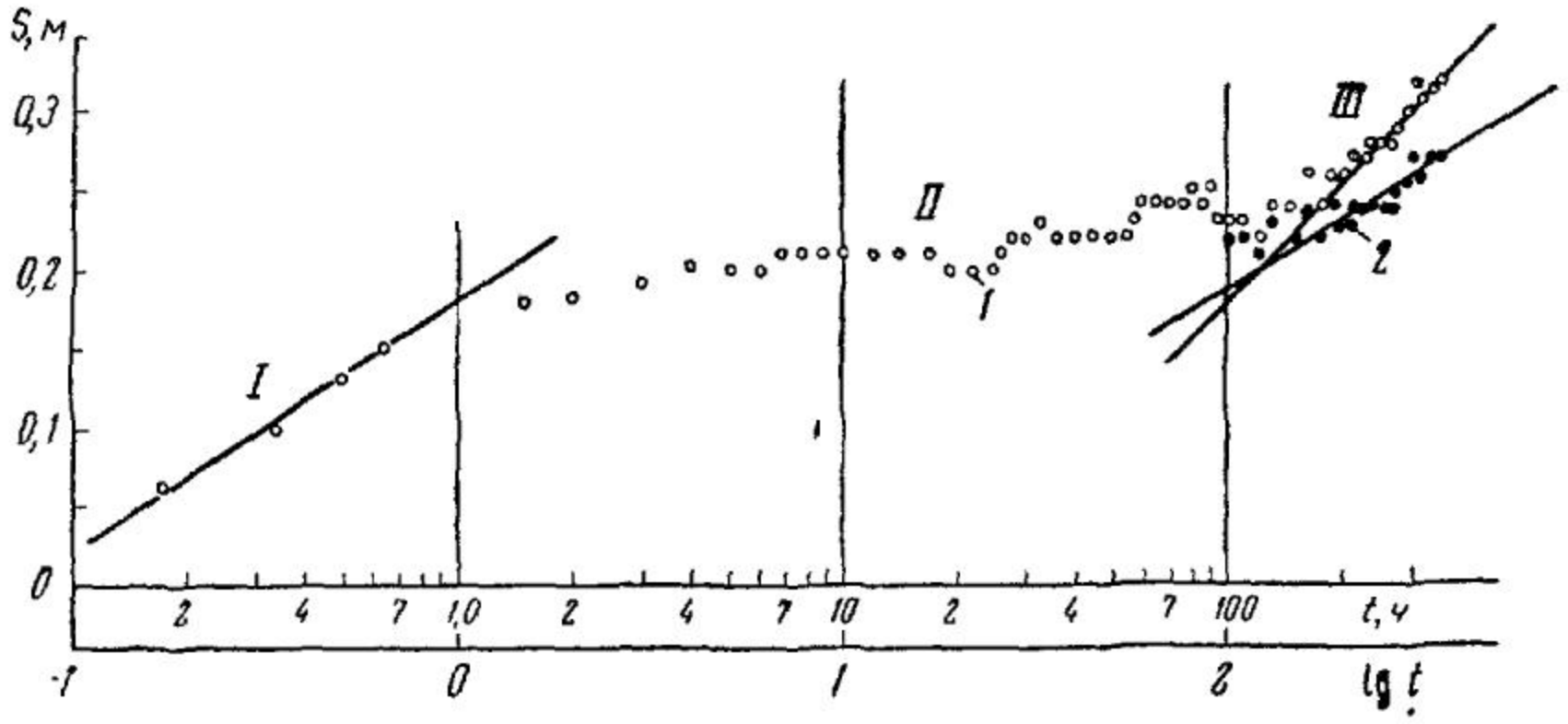



Рис. 74. График временного прослеживания понижения по скв. 154 при кустовой откачке из скв. 212 с дебитом 432 м³/сутки с учетом и без учета естественных колебаний уровня (по данным Л. М. Самсоновой, 1970 г., Урал).

*1* — замеренный уровень; *2* — исправленный уровень

| Участок графика | I | III | |
|---|---|---|---|
| | | без поправки на режим | с поправкой на режим |
| $\frac{C}{km}$, м²/сутки | 0,16<br>495 | 0,26<br>300 | 0,15<br>530 |

уровня с какой-либо скважины, находящейся в зоне независимого от откачки режима, на скважины опытного куста. При этом величина снижения уровня в эталонной скважине за соответствующий период откачки непосредственно вычитается из величины понижения уровня в опытной и наблюдательной скважинах.

В качестве примера рассмотрим результаты обработки кустовой откачки из скважины 212, проведенной из трещиноватых эффузивных пород. График прослеживания понижения уровня во времени по наблюдательной скважине 154 в полной мере отражает «эффект двойной пористости» (рис. 74).

Однако коэффициент водопроводимости, рассчитанный *по конечному* участку графика (300 м²/сутки), существенно ниже значений, определенных другими способами, и значения, полученного по на-

чальной ветви графика (495 м²/сутки), что трудно объяснимо (см. главу 6). Наблюдения за уровнем по скважине 113 вне зоны влияния откачки показали, что в период откачки имел место спад уровня, хотя и незначительный по амплитуде. После введения поправки на понижение непосредственно по замеренной величине спада в скв. 113 конечная ветвь графика значительно выположилась. Рассчитанное по ней значение $km = 530$ м²/сутки оказалось существенно выше первоначального. Оно практически совпало с данными расчетов по начальной ветви графика и площадному графику $S - \lg r$.

Таким образом, в данном случае неучет естественного спада уровня приводит почти к двухкратному занижению коэффициента водопроводимости.

Однако при неоднородном строении водоносного горизонта и зоны аэрации в разных скважинах амплитуда колебания уровня будет различной в зависимости от изменения водоотдачи пород, глубины залегания уровня, строения зоны аэрации, положения скважины в рельефе [70], причем она может различаться в несколько раз.

Поэтому непосредственное перенесение величины падения уровня с одной из режимных скважин на опытную и наблюдательную без соответствующей обработки полученных материалов может привести к существенным ошибкам.

При относительно непродолжительных откачках и плавном направленном изменении уровня во время проведения откачки и в предшествующий период для введения поправки может быть использован способ графической интерполяции или экстраполяции естественной кривой снижения уровня [166].

Если по каждой наблюдательной скважине построить график изменения уровня во времени, начиная за несколько суток до начала откачки и продолжая его до получения линии естественного изменения уровня после восстановления, то интерполяция кривой на период откачки и восстановления дает возможность получить величину поправки к понижению уровня на каждый момент времени.

При равномерной скорости изменения уровня перед откачкой и небольшой продолжительности откачки скорость естественного снижения уровня в период откачки может быть принята постоянной и поправка определена прямым расчетом (экстраполяция графика).

На рис. 75 приведен хронологический график изменения уровня по наблюдательной скважине 152184 при откачке из скважины 152612 из трещиноватых известняков в долине р. Оки. График свидетельствует, что откачка проходила при четко выраженном неустановившемся режиме. Однако при восстановлении уровня уже через трое суток форма графика становится близкой к наблюдаемой при откачке. Это свидетельствует о том, что в данном случае режим подземных вод повлиял на ход откачки.

Наблюдения за режимом подземных вод по данной скважине проводились до откачки и после нее. Интерполяция графика естественного режима и его анализ показали, что за июль 1970 г. скорость

снижения уровня была равномерной и составляла 2,7 см/сутки. Поэтому поправка на величину понижения была введена прямым расчетом ($\Delta S = 2{,}7\ t$, где $t$ — текущее время замера от начала откачки). За период откачки (9 суток) естественное снижение уровня составило 24 см или 30% от общей величины понижения в данной скважине.

График изменения уровня во времени, построенный с учетом поправки на величину понижения (см. рис. 75), свидетельствует о четко выраженном стабильном режиме при откачке.

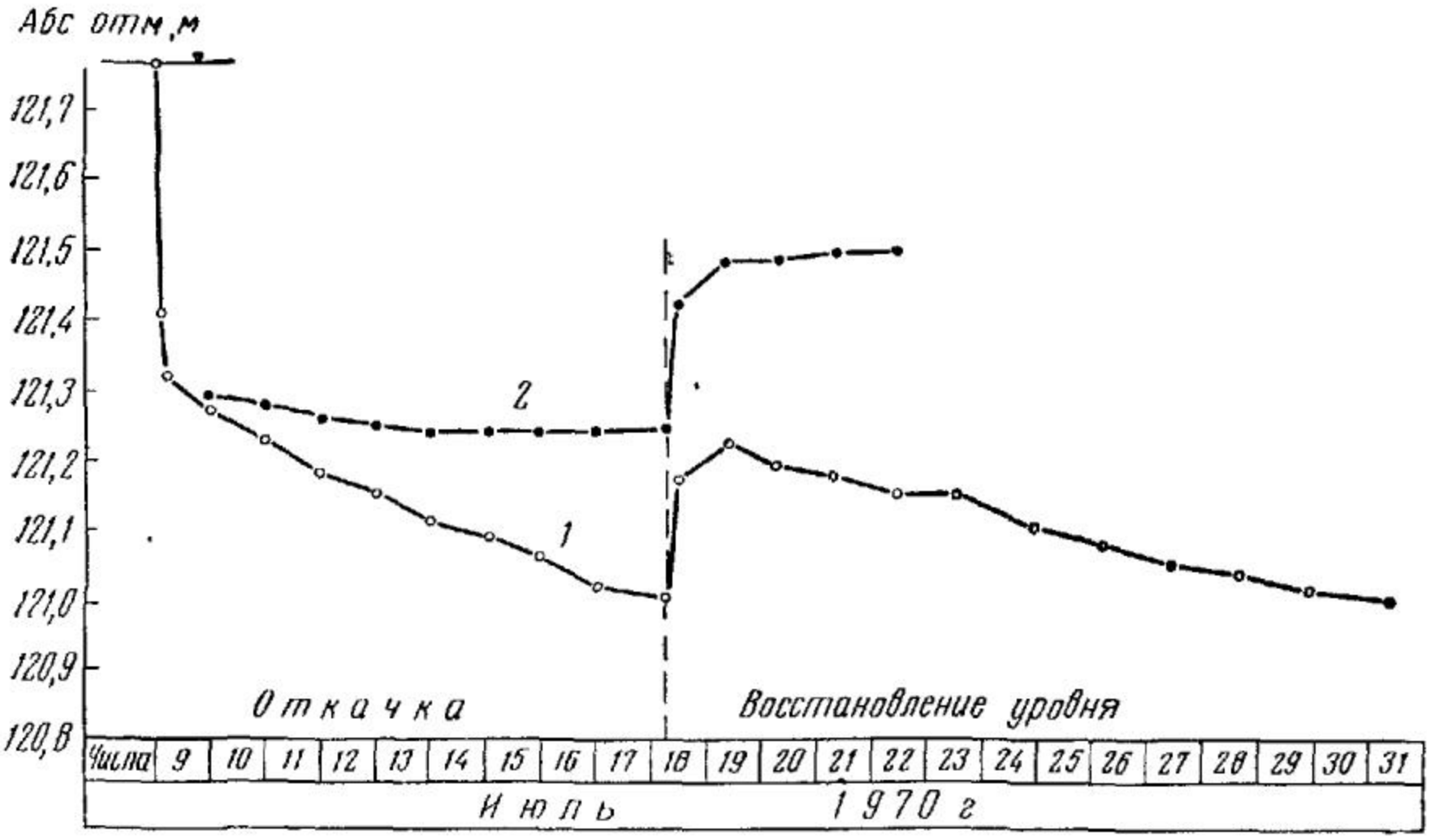



Рис. 75. График изменения уровня по скв. 152184 при опытной откачке из скв. 152612 под влиянием естественного спада уровня (по данным А. Ф. Потемкиной, 1970 г., долина р. Оки)

*1* — замеренный уровень; *2* — исправленный уровень

На длительных откачках или изменении направленности снижения уровня при их окончании интерполяция или графическая экстраполяция естественных графиков затруднительна. Поэтому в ряде случаев может быть использована аналитическая экстраполяция темпа изменения уровня.

На участках, сложенных карстующимися породами, в периоды практического отсутствия питания закономерность снижения уровня может быть описана уравнением Майе — Буссинеска [79]:

$$H = H_0 \cdot e^{-\alpha t}, \qquad (11.5)$$

где $H$ — уровень в момент времени $t$, отсчитываемый от момента с измеренным уровнем $H_0$;

$\alpha$ — коэффициент истощения.

Если до начала откачки проведен достаточный цикл наблюдений по всем наблюдательным скважинам, то для каждой из них может

быть определен коэффициент истощения $\alpha$ по данным о положении уровня на два момента времени. Затем может быть дан прогноз на естественный спад уровня в период откачки и определена приведенная величина понижения.

Такой прием был использован при обработке данных опытно-эксплуатационной откачки из весьма неравномерно закарстованных известняков и доломитов в пределах карбонового плато в районе г. Бокситогорска (по данным Г. И. Богдановой и Ж. К. Кранцфельд).

В процессе откачки стабилизация уровня достигнута не была. Однако введение поправок к понижению, рассчитанных по формуле (11.5), показало, что режим был близок к стабильному. Величина поправок по разным наблюдательным скважинам колебалась от 9 до 58 см.

## 3. КОЛЕБАНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЪЕМОВ И СПАДОВ УРОВНЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОТОКАХ И ВОДОЕМАХ

Подъемы и спады уровней в реках и озерах, приливы и отливы в морях и океанах существенно отражаются на поведении уровней в скважинах, расположенных на прибрежных участках. Эти колебания могут носить направленный характер при спаде уровня в реках и озерах в меженные периоды или ритмический в результате приливов и отливов, либо периодических дождей. При этом такие колебания часто соизмеримы с величинами понижений или даже значительно превышают их.

Характер изменения уровня в водоносном горизонте под влиянием подъема уровня в реках и озерах (водохранилищах) достаточно хорошо изучен и широко освещен в гидрогеологической литературе, посвященной вопросам подпора подземных вод. В. М. Шестаков предложил аналитические зависимости для определения изменения уровня в скважинах при различных законах изменения уровня в реке [136].

Однако в процессе обработки результатов опытных работ учет изменения уровней в опытных и наблюдательных скважинах под влиянием колебаний уровня в поверхностных водоемах и водотоках обычно не производится. При этом результаты опытных работ могут быть в значительной мере искажены или не поддаваться однозначной интерпретации.

Примером может служить график изменения уровня в наблюдательных скважинах 79н и 49н, при откачке из скв. 55 на берегу р. Днестр (рис. 76).

Первоначально откачка была проведена в течение трех суток без измерения уровня в реке, к концу откачки уровни в наблюдательных скважинах превышали статические, соответственно на 0,45 и 0,47 м, хотя первоначально они упали на 0,3 и 0,9 м. Затем откачка была повторена с одновременным измерением уровня в реке. На графике (см. рис. 76) четко видна синхронность колебаний уровня

в период откачки и восстановления в реке и скважинах. В данном случае обработка материалов откачки без учета изменения уровня в реке невозможна.

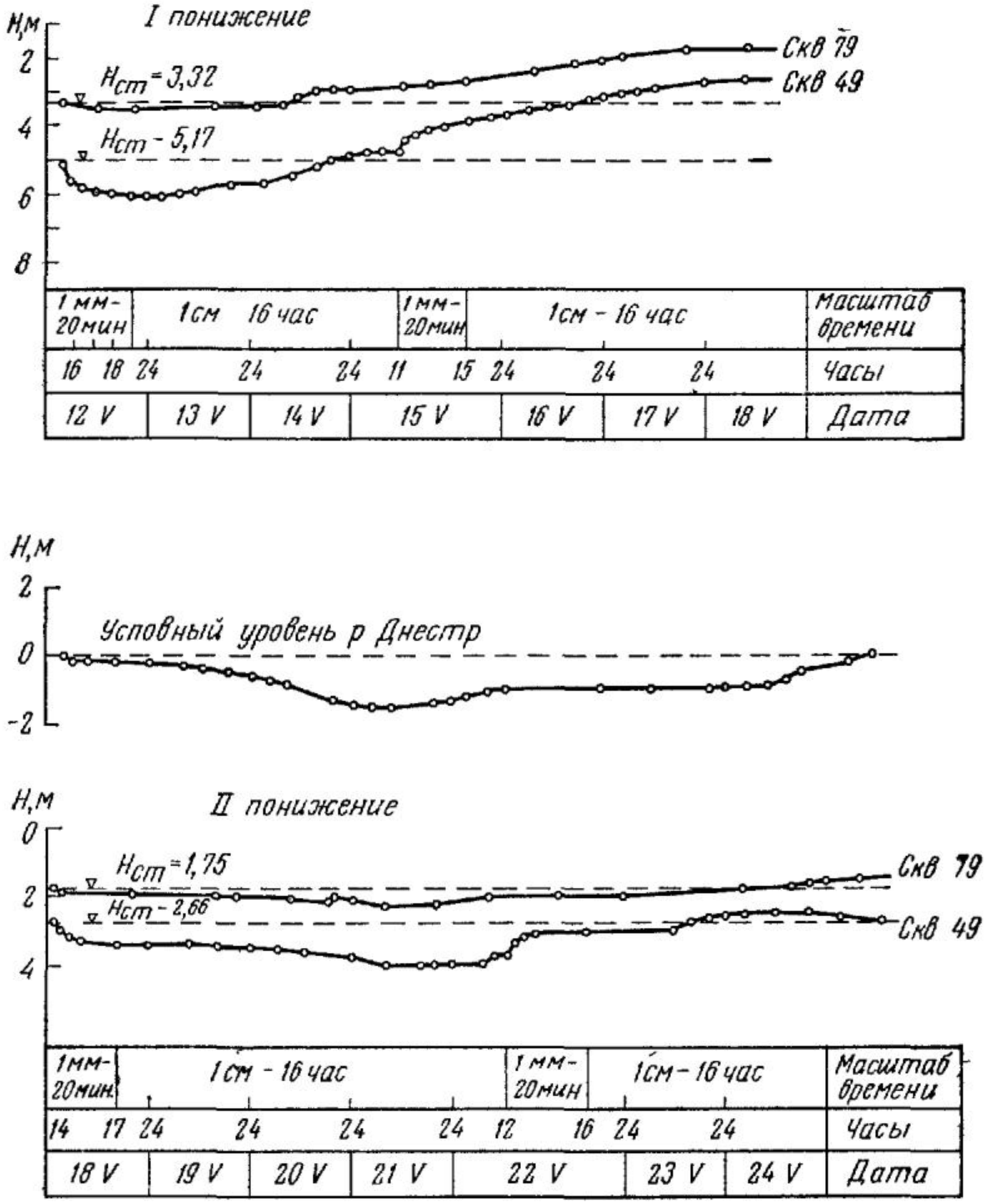



Рис. 76. Графики колебаний уровней в наблюдательных скважинах при опытной откачке из куста 55 под влиянием изменения уровня в реке (по данным Л. П. Шараевского, 1970 г., долина р. Днестр)

Такие же результаты наблюдаются часто в долинах других рек, а также на Тихоокеанском побережье СССР с большой амплитудой приливов и отливов.

Для учета изменения уровней в скважинах под влиянием колебаний уровня в поверхностных водоемах и водотоках необходимо вводить поправки в результаты опытных работ. Для получения величины поправки в реке, озере или море близ опытной скважины

устанавливается водомерный пост. По каждой скважине опытного куста строится график зависимости величины естественных колебаний уровня в них $\Delta h$ от величины колебания уровня на водомерном посту $\Delta H$. В зависимости от расстояния скважины от уреза воды и характера изменения уровня поверхностных вод такой график будет иметь прямолинейную или криволинейную форму.

Для получения графика необходимо провести до или после откачки соответствующий цикл измерения уровней в скважинах и на водомерном посту. Длительность этого цикла будет определяться теми же условиями, что и при учете колебаний уровня под влиянием изменения интенсивности питания водоносного горизонта атмосферными осадками.

В процессе откачки проводят систематические измерения уровня на водомерном посту, поэтому в любой момент времени можно определить поправку к величине понижения уровня, сняв ее непосредственно с графика. Введение поправки и определение интервала запаздывания производится так же, как и в предыдущем случае.

Введение необходимых поправок (особенно в случае направленного спада) может быть произведено также по корреляции уровней в данной скважине с эталонной скважиной, находящейся вне зоны влияния откачки, как это описано выше. Желательно, чтобы расчетная и эталонная скважины находились на одинаковом расстоянии от береговой линии.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Естественные колебания уровней подземных вод часто существенно отражаются на результатах опытных работ, особенно при небольших величинах понижения уровня воды и медленном темпе его изменения, что приводит к ошибкам при определении гидрогеологических параметров и анализе характера режима движения подземных вод при откачке.

2. Учет этих колебаний можно произвести путем введения соответствующих поправок к величине понижения уровня воды в скважине. Принцип определения этих поправок может быть аналогичен во всех рассмотренных случаях и основан на построении корреляционных связей.

3. Обработке материалов откачки в таких случаях должно предшествовать вычисление величины приведенного понижения и построение графиков с учетом полученных поправок.

Глава 12

# ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ РАБОТ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПОСТАНОВКЕ

## 1. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОТКАЧЕК

Так как опытные откачки являются основным видом гидрогеологических исследований, проводимых при решении самых разнообразных задач, вопросы методики проведения откачек рассматриваются в специальной литературе в течение продолжительного времени. При этом методика откачек совершенствовалась в связи с развитием методов оценки эксплуатационных запасов и определения основных гидрогеологических параметров.

Впервые наиболее последовательно соображения о постановке опытных работ высказал Г. Тим, который предложил определять коэффициенты фильтрации водоносных горизонтов при помощи кустовых откачек с несколькими наблюдательными скважинами [181]. В СССР вопросами методики опытных откачек одним из первых занимался Н. К. Игнатович [58]. В своей работе наряду с методами расчета коэффициентов фильтрации, основанными на теории установившегося движения, он изложил целый ряд рекомендаций по методике постановки и проведения откачек (по выбору и разбивке опытного участка, количеству наблюдательных скважин, системе их расположения и расстояниям от центральной до наблюдательной скважин, количеству понижений уровня и т. д.). Эти рекомендации для своего времени имели большое значение, отвечали достигнутому уровню развития динамики подземных вод и впоследствии были использованы во многих методических пособиях и руководствах.

Ранее, когда расчеты велись по теории установившегося движения, одним из основных положений методики опытных работ являлось достижение стационарного режима фильтрации. Однако, как видно из анализа режима подземных вод при опытных откачках, во многих случаях достижение стабильного режима при откачках невозможно. На нереальность требования проведения опытных откачек при стабильном режиме одним из первых указал Н. К. Гиринский [36]. Он отмечал, что стационарный режим является лишь частным случаем более общего неустановившегося режима движения

подземных вод. Н. К. Гиринский предложил увязывать такие основные положения методики откачек, как время, понижение и расстояние до наблюдательных скважин, с примерными величинами фильтрационных и емкостных параметров. Тем не менее требование достижения стационарного режима фильтрации еще долго господствовало в гидрогеологической литературе и даже в самое последнее время был опубликован ряд работ [67, 68, 112], в которых за критерий при выборе продолжительности опытных откачек принимается время стабилизации уровня при постоянном дебите.

Вопросы размещения наблюдательных скважин рассматривались в работах Е. Е. Керкиса [62] и С. А. Коля [66]. В частности, С. А. Коль рекомендовал при размещении наблюдательных скважин пользоваться правилом геометрической прогрессии с тем, чтобы получать равномерное расположение точек на графиках зависимости понижения от логарифма расстояния, используемого для определения параметров. Е. Е. Керкис рекомендовал руководствоваться при размещении наблюдательных скважин необходимостью обеспечения некоторого минимального понижения, превышающего точность замеров уровня. Некоторые предложения указанных авторов, например относительно ориентировки лучей опытных кустов, длительности возмущения и т. д., — устарели. Однако многие полезные рекомендации, к сожалению, не получили должного распространения в современной разведочной практике или были забыты.

В 1960 г. была опубликована сводная работа И. А. Скабалланович «Методика опытных откачек». В ней также были даны рекомендации по выбору продолжительности опытных работ, количества и системы расположения наблюдательных скважин и другие вопросы методики откачек. Основное внимание в этой работе было уделено вопросам определения коэффициента фильтрации, а методика опытных откачек, проводимых с иным целевым назначением, практически не рассматривалась. Основой для выбора методики опытных откачек, как и в других ранее опубликованных работах, являлась теория установившейся фильтрации.

В конце пятидесятых — начале шестидесятых годов в практике гидрогеологических расчетов начали широко использоваться методы, основанные на теории неустановившегося движения подземных вод, что вызвало существенные изменения в методике обработки данных опытных работ. Рекомендации для постановки опытов с учетом современных достижений в этой области содержатся в работах Ф. М. Бочевера, В. М. Шестакова, Л. С. Язвина [10, 19, 30, 132]. В частности, Л. С. Язвиным для условий неограниченного равномерно проницаемого водоносного горизонта высказаны соображения по схеме опытного куста, характеру, степени и длительности возмущения в зависимости от необходимости достижения квазистационарного режима фильтрации в заданной области.

Из более поздних публикаций, в которых рассматривались вопросы методики опытных откачек, следует отметить работы Б. Г. Самсонова [106, 108], Б. В. Боревского [13, 15] и коллектива авторов

под редакцией В. М. Шестакова и Д. И. Башкатова [118]. Эти работы посвящены в основном методике обработки опытно-фильтрационных данных для определения основных гидрогеологических параметров, но содержат целый ряд рекомендаций по постановке и проведению откачек в различных гидрогеологических условиях с учетом основных закономерностей режима подземных вод при откачках. Так, в работе Б. Г. Самсонова рассмотрены вопросы расположения наблюдательных скважин, продолжительности опытных работ, интенсивности возмущения и т. д. в зависимости от условий интерпретации данных опытных работ. Б. В. Боревским даны соответствующие рекомендации для водоносных горизонтов, приуроченных к трещиноватым породам, а в работе [15] — рекомендации по расположению наблюдательных скважин в слоистых толщах и в условиях взаимосвязи поверхностных и подземных вод и некоторые другие.

Методика опытных работ в общем случае определяется тремя основными факторами: 1) назначением опытных работ; 2) стадией гидрогеологических исследований; 3) гидрогеологическими условиями разведуемого месторождения подземных вод. Методика опытных работ включает в себя следующие основные вопросы.

1. Выбор вида откачки (пробная, опытная, одиночная, кустовая или групповая, опытно-эксплуатационная).
2. Выбор местоположения и схемы опытного куста — количества наблюдательных скважин, системы их расположения, расстояний между наблюдательными и центральной скважинами и т. д.
3. Характер и степень возмущения (постоянство дебита или понижения уровня, величина дебита центральной скважины).
4. Продолжительность откачки.
5. Оборудование центральных и наблюдательных скважин.

## 2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОСТАНОВКЕ ОПЫТНЫХ РАБОТ

### Выбор вида откачки

Выбор вида откачки — пробная, опытная одиночная, кустовая или групповая, опытно-эксплуатационная — определяется назначением откачки и стадией поисково-разведочных работ, а также гидрогеологическими условиями разведуемого месторождения подземных вод.

**Пробные откачки** проводятся на всех стадиях гидрогеологических исследований. На стадии поисков их основной целью является получение сравнительной характеристики фильтрационных свойств пласта на отдельных участках распространения водоносного горизонта и качества подземных вод, а также для определения свободной или пьезометрической поверхности подземных вод. На стадиях предварительной и детальной разведки пробные откачки проводятся из всех разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин для предварительного определения возможной производительности скважины.

**Одиночные опытные откачки** проводятся только на стадии детальной разведки из разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин, когда необходимо определить зависимость между дебитом скважины и понижением уровня в ней. Такие откачки следует проводить главным образом при применении гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов, если имеющееся в распоряжении гидрогеологов-разведчиков насосное оборудование не может обеспечить получение проектного дебита.

**Опытные кустовые откачки** проводятся на стадиях предварительной и детальной разведок, главным образом для определения расчетных гидрогеологических параметров и оценки граничных условий. В тех случаях, когда при откачке из одной скважины не удается добиться достаточно надежных для последующей интерпретации понижений уровня (в связи с высокой водопроводимостью водоносных горизонтов), проводится групповая откачка.

**Опытно-эксплуатационная откачка** из одной или нескольких скважин проводится только на стадии детальной разведки в сложных гидрогеологических условиях для определения опытным путем возможной производительности водозабора или установления закономерности изменения уровней при эксплуатации.

## Выбор местоположения и схемы опытного куста

### *Местоположение опытного куста*

Опытные кусты целесообразно располагать на участках проектируемых водозаборов так, чтобы получить по возможности полную характеристику в первую очередь площади будущего водозабора и ближайших к ней участков водоносного горизонта. В тех случаях, когда кустовые откачки проводятся для изучения граничных условий водоносных горизонтов, местоположение куста определяется назначением откачки. Например, для изучения условий на границах различных зон водоносного горизонта, значительно отличающихся по водопроводимости или водоотдаче, целесообразно центральные скважины располагать вблизи изучаемой границы, а наблюдательные скважины — по обе стороны от нее. При выборе местоположения опытного куста следует учитывать, что наилучшие результаты при определении параметров дают откачки, в процессе проведения которых на опытные закономерности понижений уровня не накладывается влияние границ. Поэтому по возможности нужно стремиться так выбирать точки для заложения опытных и наблюдательных скважин, чтобы было исключено влияние границ. Однако эта рекомендация не должна приводить к удалению опытного куста от участка проектируемого водозабора. Если по тем или иным соображениям водозабор проектируется закладывать вблизи границ пласта, на этом же участке целесообразно провести и опытную откачку несмотря на трудности в интерпретации ее результатов при определении основных гидрогеологических параметров. Последние следует

определять по зависимостям, учитывающим влияние границ (см. главы 8, 9).

В тех случаях когда по условиям заложения проектируемого водозабора можно избежать влияния границ, при размещении возмущающих и наблюдательных скважин опытного куста следует пользоваться площадными критериями, обоснованными в главе 4. Влияние границы, независимо от ее природы, можно считать пренебрежимо малым в течение времени $t > t_к$, если дальняя наблюдательная скважина располагается от возмущающей на расстоянии $r \leqslant 0{,}5l$ (где $l$ — расстояние до границы). Если конфигурация границы известна детально, допустимо большее удаление наблюдательных скважин: в параллельном луче $r \leqslant 0{,}6l$, во внутреннем луче $r \leqslant 0{,}8l$. Такое удаление позволяет использовать крайние наблюдательные скважины для определения параметров способом площадного прослеживания. Для контроля необходимо иметь в опытном кусте две-три наблюдательные скважины, удаленные от возмущающих на расстояние $r \leqslant 0{,}3l$, по которым возможно определение параметров временным прослеживанием. При соблюдении критерия по дальней скважине это требование соблюдается автоматически.

В соответствии с приведенными критериями положение наблюдательных и возмущающих скважин требует взаимной увязки. Это достигается выбором местоположения возмущающей скважины относительно разведанных границ водоносного горизонта.

Опытные кустовые откачки, как уже говорилось, проводятся в основном на участке проектируемого водозабора и характеризуют сравнительно небольшую площадь. Доказательство возможности экстраполяции полученных величин на область проектной депрессионной воронки основывается на результатах пробных откачек из всех поисковых и разведочных скважин.

Местоположение скважин для опытно-эксплуатационной откачки во всех случаях следует приурочивать к участку будущего водозабора.

*Схема опытного куста*

Составление схемы опытного куста заключается в обосновании количества возмущающих и наблюдательных скважин и их взаимного расположения в плане и в разрезе опробуемого водоносного горизонта. Под примерной схемой опытного куста, используемого для определения параметров, понимается такое количество скважин и такое их взаимное расположение, которые при степени возмущения, обеспечивающей понижение $S_0 = 3—4$ м в возмущающих скважинах, и длительности возмущения 5—10 суток обеспечивали бы представительный охват созданной воронки депрессии так, чтобы разность понижения в соседних и понижение в наиболее удаленных наблюдательных скважинах значительно превышали бы точность замеров уровня подземных вод (составляя не менее 20—30 см). Необходимо, чтобы такая схема куста позволяла применить способы

временного и площадного прослеживания для обработки опытных данных. Для этого целесообразно располагать наблюдательные скважины равномерно в логарифмическом масштабе.

Схема опытного куста для изучения граничных условий (взаимосвязи подземных и поверхностных вод, взаимодействия подземных

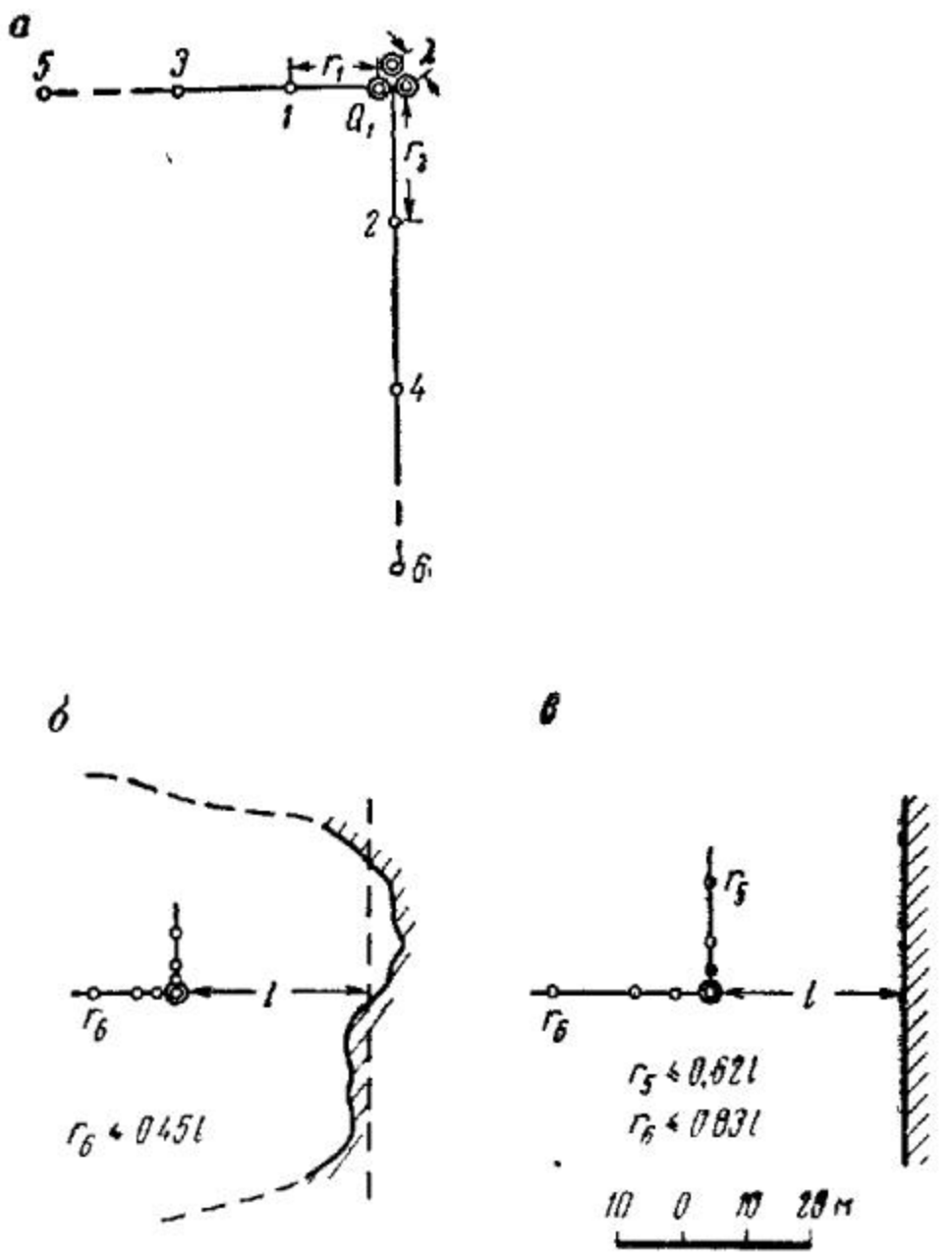



Рис. 77. Схемы опытных кустов для определения параметров в неограниченном пласте (*а*) и ограниченном пласте со сложной (*б*) и простой (*в*) конфигурацией границ.

Пример расчета в неограниченном пласте: $h=20$, $\lambda=4$, $r_1=14$, $r_2=21$, $r_3=32$, $r_4=47$, $r_5=71$, $r_6=106$ м

$$r_n = r_1 \cdot \alpha^{n-1}$$

| Напорный пласт | Безнапорный пласт |
|---|---|
| $r_1=(0{,}7\div 1)\,m$ | $r_1=(0{,}7\div 1)\,h$ |
| $m \leqslant 200$ м | $h \leqslant 90$ м |
| $\alpha=2{,}5$ | $\alpha=1{,}5$ |
| $\lambda=0{,}5\,r_1$ | $\lambda=0{,}3\,r_1$ |

$$Q_1 > Q_2 > Q_3$$

вод различных горизонтов) должна обеспечить получение необходимой информации для оценки влияния исследуемых границ. Примерные схемы опытных кустов показаны на рис. 77.

## Количество скважин в опытном кусте

Если исходить только из технических приемов обработки опытных данных, то определение основных расчетных параметров возможно при одной, а с необходимостью контроля — с двумя наблюдательными скважинами. Но это было бы возможно при идеально однородном водоносном горизонте. В действительности такие случаи чрезвычайно редки, кроме того, судить о степени сложности условий опробуемого участка мы можем в основном только после завершения опытных работ. Учитывая это, необходимо, чтобы минимальное количество наблюдательных скважин даже в относительно простых условиях при определении основных расчетных параметров давало бы возможность простейшего осреднения и контроля определяемых величин. Следовательно, минимальное количество наблюдательных скважин в опытном кусте должно быть не менее трех. И только

в достаточно однородных пластах (при коэффициенте вариации $W_{km} =$ $= 30—40\%$) можно ограничиться двумя наблюдательными скважинами с использованием в дальнейшем для определения водопроводимости формулы Дюпюи. Необходимое количество скважин больше минимального будет зависеть:

1) от степени сложности природных условий в отношении интерпретируемости опытных данных;

2) от назначения опытных кустов;

3) от глубины залегания испытуемого горизонта;

4) от возможности совмещения функций разведочных и наблюдательных скважин.

В отношении сложности природных условий при определении параметров различаются простые и сложно интерпретируемые случаи. К первым относятся опытные участки в относительно однородных напорных пластах, условно неограниченных в пределах длительности опыта и при положении наблюдательных скважин за пределами зоны прискважинных помех. К простым можно относить также условия в ограниченных пластах, когда наблюдательные скважины расположены в нейтральной зоне относительно граничных помех (см. рис. 12). Простыми можно квалифицировать условия в сложнослоистых толщах при совершенном вскрытии их возмущающими и наблюдательными скважинами.

Сложно интерпретируемыми считаются все те случаи, при которых представительные участки опытных закономерностей являются асимптотическими и проявляются с запаздыванием, причем сам факт и величина запаздывания непрогнозируемы. Сюда относятся участки в поровых безнапорных водоносных горизонтах, участки в напорных и безнапорных трещинных водоносных горизонтах. К сложным относятся условия опробования слоистых толщ, особенно, когда отсутствуют разделяющие слабопроницаемые прослои. При отсутствии или наличии последних, но при ощутимой проницаемости, эффект перетекания проявляется за время, соизмеримое с длительностью опытного возмущения.

Во всех случаях, когда представительными для обработки являются асимптотические участки, конечной целью опыта считается достижение общего комбинированного графика для всех наблюдательных скважин. Время выхода отдельных графиков на общую асимптоту зависит от удаленности наблюдательных скважин от возмущающей так, что нередко отдельные графики либо не достигают асимптоты, либо бывают представлены на ней очень малым числом точек. Для уверенной интерпретации общего графика чаще всего требуется четыре-пять наблюдательных скважин (см. рис. 26).

Наиболее сложными для интерпретации являются результаты опробования трещинно-карстовых водоносных горизонтов. Способ площадного прослеживания в этом случае чаще всего оказывается неприменимым, поэтому единственным способом контроля при определении коэффициента водопроводимости является проверка стабильности параметров, рассчитанных по временным графикам, по

площади. Для этого бывает необходима некоторая выборка до 10 частных значений.

При определении количества наблюдательных скважин необходимо также исходить из степени хаотической неоднородности, поскольку последняя определяет степень рассеяния значений пьезопроводности при временно́м прослеживании и рассеяние точек на площадных графиках. Исходя из анализа, изложенного в главе 10, рекомендуется принимать количество наблюдательных скважин для однородных водоносных пластов, равное двум-трем, для неоднородных пластов — трем-четырем, для весьма неоднородных — четырем-десяти. Критерием степени неоднородности служит коэффициент вариации, определяемый по данным одиночного опробования.

К сложным случаям относятся те, при которых имеет место сочетание нескольких факторов аномальности.

Таким образом, количество наблюдательных скважин должно определяться в зависимости от установленной или предполагаемой сложности условий разведуемого участка.

Количество наблюдательных скважин зависит также от назначения опытного куста. Если результаты кустового опыта используются для прогнозного расчета гидродинамическим методом, наблюдательных скважин должно быть больше, для подсчета гидравлическим методом — меньше. Максимальным должно быть количество наблюдательных скважин в кустах, предназначенных для изучения условий участка будущего водозабора, и меньшим в опытных кустах, предназначенных для и́ных целей, например, для изучения граничных условий. Имеет значение также и стадия исследования: при производстве опытных работ на детальной стадии назначается максимальное для данных условий количество наблюдательных скважин по сравнению со стадией предварительной разведки. Возможны и такие случаи, когда по результатам кустового опыта на стадии предварительной разведки увеличивается число наблюдательных скважин, и опыт повторяется.

Количество наблюдательных скважин зависит от глубины залегания водоносного горизонта. При больших глубинах (150—300 м) оно не должно превышать минимально необходимого количества для данных условий, в то время как при малых глубинах допустимо количество больше минимально необходимого. Однако минимальное число наблюдательных скважин при больших глубинах может привести к тому, что при отрицательном исходе интерпретации неоправданные затраты на бурение и проведение опыта в целом могут оказаться больше затрат на бурение одной-двух дополнительных наблюдательных скважин.

Количество наблюдательных скважин определяется с учетом использования ранее пробуренных скважин иного назначения. Этим количество наблюдательных скважин может быть как угодно увеличено по сравнению с необходимым их числом для данных условий. Целесообразно использовать все соответствующим образом оборудованные скважины, попадающие в пределы фиксируемой части

депрессионной воронки. В некоторых условиях, особенно при большой глубине залегания горизонта, продолжительность возмущения может быть увеличена на столько, сколько требуется для получения фиксируемого понижения и в более удаленных разведочных скважинах.

Для определения количества наблюдательных скважин полезно изучить существующую практику опытных работ. Для этого был проведен анализ выборки из 49 опытных кустов с количеством наблюдательных скважин от 2 до 20. Опыты производились в широком диапазоне условий по сложности интерпретации. Кустовые опыты производились для водоснабжения и изучения обводненности месторождений твердых полезных ископаемых. Работы выполняли территориальные и специализированные организации Министерства геологии СССР и некоторые другие организации. Анализ практикуемого количества наблюдательных скважин производился следующим образом. Выполнена повторная интерпретация результатов кустовых опытов. При известном исходе интерпретации анализировали зависимость необходимого количества наблюдательных скважин от указанных факторов, после чего выполнен статистический анализ выборки. В пяти случаях из 49 исход интерпретации оказался отрицательным, в остальных — положительным. Положительным исходом считается тот, при котором определены искомые основные параметры водоносного горизонта и расхождения при контроле по способам обработки не превышают 30%. Последующий анализ показал, что задаваемое число наблюдательных скважин практически не зависит от условий по сложности интерпретации, от назначения опытного куста, а в интервале глубин 5—200 м не зависит и от глубины залегания водоносного горизонта. Отмечается стремление к увеличению общего количества наблюдательных скважин за счет разведочных, используемых в качестве наблюдательных. Существенно то обстоятельство, что количество наблюдательных скважин и их размещение, как правило, не увязывается с длительностью и степенью возмущения, а следовательно, и с размерами депрессионной воронки, так что часть из них оказывается бесполезной. Таким образом, назначение количества наблюдательных скважин в опытных кустах оказывается произвольным.

Обратимся к статистическому анализу. На рис. 78, *б* показаны гистограммы и вероятностные графики распределения числа наблюдательных скважин. Опытное распределение в интервале 2—20 не противоречит логнормальному закону. Среднегеометрическое равно шести, с поправкой за ограниченность выборки — семи. При положительном исходе интерпретации такое количество наблюдательных скважин можно считать достаточным. Заметим, что из пяти случаев с отрицательным исходом два связаны с малым числом наблюдательных скважин (по две скважины), остальные не связаны с количеством наблюдательных скважин. Анализ каждого опытного участка в отдельности показывает, что практикуемое количество скважин больше 10 не является необходимым, но во многих случаях

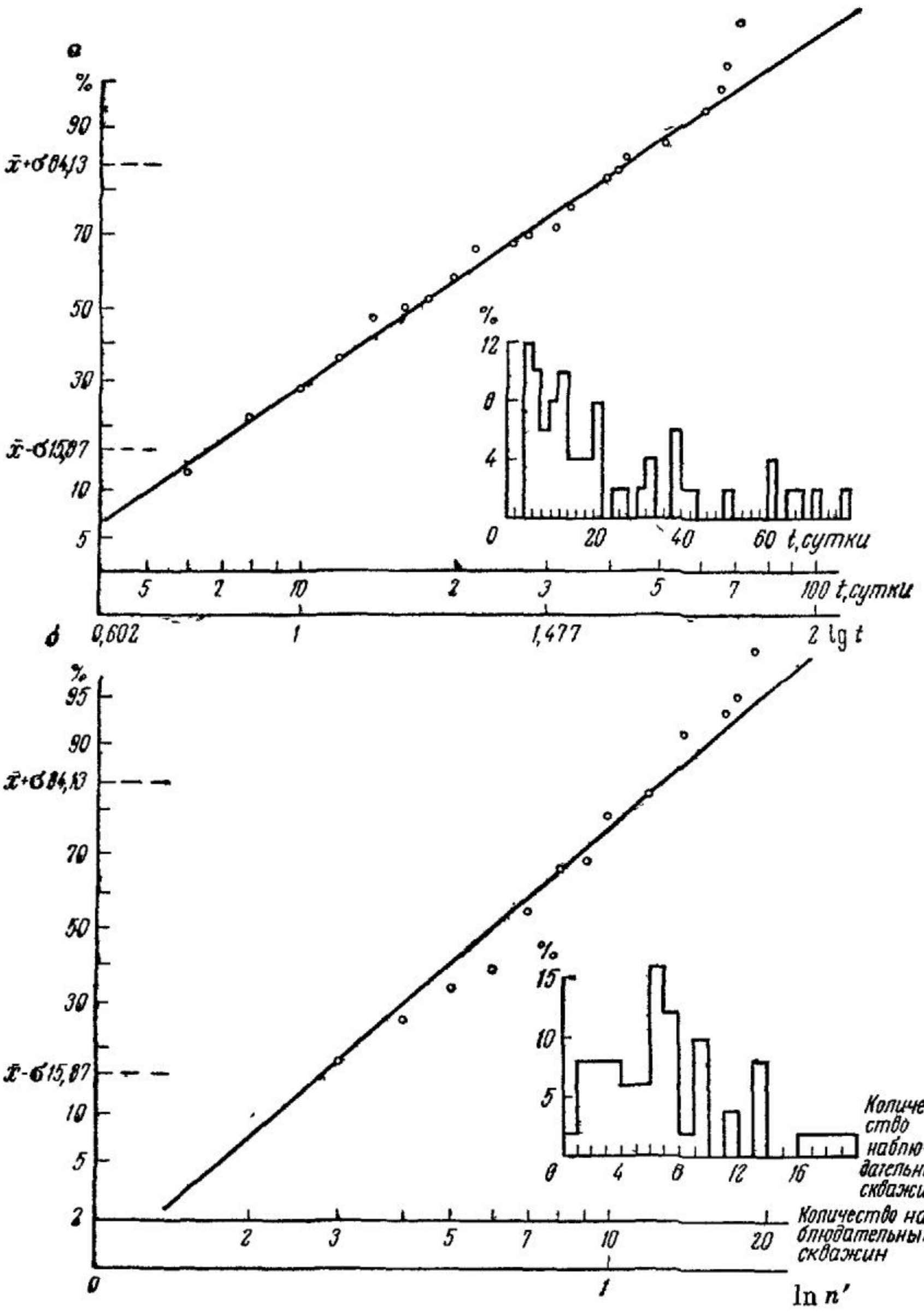



Рис. 78. Вероятностные графики и гистограммы:

*а* — длительности опытных возмущений ($n = 50$, $\breve{C} = 17$, $\varepsilon = 2{,}65$, $\sigma_{\bar{x}} = \pm 2{,}3$) и *б* — числа наблюдательных скважин в опытных кустах ($n = 49$, $\breve{C} = 6$, $\varepsilon = 2{,}16$, $\sigma_{\bar{x}} = \pm 0{,}7$)

справдано, так как для наблюдений использовались разведочные скважины.

Количество возмущающих скважин определяется необходимой степенью возмущения — от одной до четырех скважин.

### Размещение возмущающих и наблюдательных скважин

В размещении скважин опытного куста как для определения параметров, так и для изучения граничных условий следует придерживаться традиционной лучевой системы. Количество лучей и выбор их направления зависит от сложности условий опробуемого участка, назначения опытного куста, количества наблюдательных скважин, схемы проектируемого водозабора.

В зависимости от этого могут быть одно- двух- и трехлучевые опытные кусты. Двухлучевые кусты следует задавать при опробовании анизотропных водоносных горизонтов с направлением лучей по предполагаемым осям анизотропии. Двухлучевыми должны быть кусты при опробовании ограниченных пластов с целью определения параметров, особенно тогда, когда применение рекомендованных площадных ограничений затруднительно. При этом направление лучей определяется заинтересованностью в информации о границах. Если такая информация необходима или желательна, один луч ориентируется параллельно, второй перпендикулярно к границе (луч встречный). Если влияние границы нежелательно, задается луч параллельный и нормальный от нее (луч внутренний). При малом количестве наблюдательных скважин задается один луч. Количество и ориентировка лучей должны быть увязаны с расчетной схемой водозабора.

Возмущающие скважины должны быть расположены в вершине одного или нескольких лучей. Наблюдательные скважины следует располагать так, чтобы они находились в зоне квазистационарного режима и чтобы при заданной степени и длительности возмущения разность понижений в соседних и понижение в наиболее удаленных наблюдательных скважинах существенно превышали бы точность замеров уровня подземных вод. Кроме того, при размещении наблюдательных скважин для определения основных гидрогеологических параметров необходимо стремиться к тому, чтобы влияние прискважинных и граничных помех было минимальным. Поскольку зависимость понижения от расстояния является логарифмической, то расстояния наблюдательных скважин от возмущающих должно обеспечивать равенство расстояний между ними в логарифмическом масштабе; результатом этого будет равномерное положение точек на графике площадного прослеживания. Перечисленные требования могут быть соблюдены, если размещать наблюдательные скважины по правилу геометрической прогрессии. Тогда расстояние от возмущающей до соответствующей наблюдательной скважины ($r_n$), неза-

висимо от количества лучей и их ориентировки, можно определить по следующей полуэмпирической формуле:

$$r_n = r_1 \cdot \alpha^{n-1}, \qquad (12.1)$$

где $r_1$ — расстояние до ближайшей наблюдательной скважины;
$\alpha$ — эмпирический коэффициент, принимаемый для безнапорных горизонтов равным 1,5 и для напорных 2,5;
$n$ — порядковый номер наблюдательной скважины. Нумерация производится в возрастающем порядке в направлении от возмущающей скважины.

Рассмотрим более подробно величины, входящие в формулу (12.1). Существенное значение для размещения желаемого числа скважин имеет расстояние до ближней наблюдательной скважины. В практике разведочных работ возмущающие скважины, как правило, несовершенны. Стремясь к минимальному влиянию несовершенства возмущающей скважины на понижение в первой наблюдательной скважине, необходимо задавать наблюдательную на расстоянии $r_1 \geqslant m$. При этом условии влияние несовершенства пренебрежимо мало [32, 127]. Практически допустимой является величина $r_1 \geqslant 0{,}7\,m$, при которой влияние несовершенства при степени ее $\frac{l}{m} \geqslant 0{,}2$ (где $l$ — длина фильтра) не превышает 10%.

Таким образом, рекомендуется принимать $r_1 \approx (0{,}7—1)\,m$. Такое расстояние до первой наблюдательной скважины позволяет разместить в фиксируемой части депрессионной воронки от трех до шести наблюдательных скважин при заданных условиях — мощность безнапорного горизонта не превышает 90 м, а мощность напорного 200 м. При опробовании водоносных горизонтов большей мощности или, если уменьшение числа наблюдательных скважин при мощностях, близких к указанным предельным, нежелательно, можно принимать $r_1 \leqslant m$. Но в этих случаях, если на графиках площадного прослеживания отмечается отклонение первой точки выше осредняющей прямой, необходимо вводить поправку к расстоянию. Для этого можно воспользоваться известными рекомендациями [10, 32], тогда приведенное расстояние до первой наблюдательной скважины получается из следующего выражения:

$$\lg r_{\text{пр}} = \lg r_1 - 0{,}2\xi, \qquad (12.2)$$

$r_1$ и $r_{\text{пр}}$ — соответственно истинное и приведенное расстояние до ближайшей наблюдательной скважины; $\xi$ — поправка за несовершенство по Н. Н. Веригину, зависящая от отношений $\frac{l}{m}$ и $\frac{m}{r}$, где $l$ — длина фильтра возмущающей скважины в водоносном горизонте мощностью $m$, $r$ — расстояние от возмущающей до первой наблюдательной скважины.

Эмпирические коэффициенты $\alpha$ подобраны путем численного анализа так, что при степени возмущения, обеспечивающей понижение в возмущающих скважинах в напорном пласте $S_0 = 4$ и

в безнапорном пласте $S_0 = 3$ м, при длительности опытного возмущения около 10 суток разность понижений в соседних и понижение в наиболее удаленной наблюдательных скважинах будет не меньше 20 см.

Нумерация наблюдательных скважин при нескольких лучах в опытном кусте производится так, что скважины с нечетными номерами располагаются в одном, а с четными — в другом луче. Если имеется необходимость в большем количестве лучей, то в третьем помещают скважины с последующими нечетными, а в четвертом — с последующими четными номерами. Примерная схема куста показана на рис. 77, *а*.

Исходя из заданных условий, расстояния до наиболее удаленных наблюдательных скважин рекомендуется ограничивать 150 м в безнапорных и 1500 м — в напорных водоносных горизонтах.

В случаях раздельного опробования отдельных слоев слоистых толщ при вероятном перетоке из контактирующих слоев (например, слоистые толщи с невыдержанными разделяющими слоями или без разделяющих слоев) при размещении наблюдательных скважин можно ориентировочно руководствоваться требованиями, относящимися к безнапорным пластам. Более строгие рекомендации в этих условиях затруднительны, поскольку они определялись бы величиной неизвестного параметра перетока.

При суммарном опробовании слоистых толщ требования к размещению наблюдательных скважин будут зависеть от качества верхнего слоя. При водоупорном верхнем слое и положении пьезометрического уровня выше его подошвы на величину, большую или равную опытному понижению, следует руководствоваться рекомендациями для напорного пласта. При отсутствии верхнего водоупора и мощности верхнего проницаемого слоя, большей или равной опытному понижению, размещать наблюдательные скважины можно, как в безнапорном пласте.

В опытных кустах для оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод наблюдательные скважины следует располагать по двум лучам — параллельному реке и перпендикулярному, направленному от возмущающей скважины к реке. В параллельном луче должно быть оборудовано минимум две-три наблюдательные скважины (в зависимости от степени однородности пласта). Данные этих скважин используются для определения водопроводимости по формуле Дюпюи или по графику $S - \lg r$. Расстояния между центральной и наблюдательными скважинами на параллельном луче могут определяться также по формуле (12.1), но желательно, чтобы расстояние от дальней наблюдательной скважины до центральной не превышало расстояния от скважины до реки.

Наблюдательные скважины, расположенные на луче, перпендикулярном реке, используются для качественной оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод и для определения показателя гидравлического сопротивления $\Delta L$. Одна из наблюдательных скважин этого луча должна быть обязательно пробурена

на урезе реки, другая в непосредственной близости от центральной, но по возможности на расстоянии, превышающем 0,7 мощности водоносного горизонта. Для оконтуривания воронки депрессии в сторону коренного берега желательно пробурить также наблюдательную скважину на расстоянии, равном расстоянию между центральной скважиной и урезом реки. На узких реках целесообразно закладывать наблюдательную скважину также на другом берегу реки. Кроме наблюдательных скважин опытного куста при изучении условий взаимосвязи подземных и поверхностных вод следует оборудовать наблюдательную скважину, находящуюся в аналогичных геоморфологических условиях, но вне влияния опытной откачки. Данные изменения уровня по этой скважине должны использоваться для корректировки понижений уровней, замеренных при откачках, как это было показано в главе 11.

При двухслойном строении речной долины наблюдательные скважины должны оборудоваться как на опробуемый горизонт, так и на горизонт, через который происходит фильтрация поверхностных вод, причем одна из наблюдательных скважин на верхний горизонт должна быть расположена непосредственно у центральной скважины. В опытных кустах, которые сооружаются для изучения условий взаимодействия водоносных горизонтов (двухслойные и многослойные толщи), наблюдательные скважины следует закладывать как на опробуемый водоносный горизонт, так и на горизонты, из которых может происходить перетекание. Скважины, оборудованные на опробуемый горизонт, используются для определения основных гидрогеологических параметров и коэффициента перетекания, а на смежные горизонты — для качественного решения вопроса о наличии и интенсивности перетока и выбора расчетной схемы для определения параметров и последующей оценки запасов.

Количество наблюдательных скважин на смежный горизонт и их расстояния от центральной определяются так же, как и при откачках, проводимых для расчета параметров. Дальнюю наблюдательную скважину при этом желательно располагать на расстоянии, определяемом из соотношения $\frac{r}{B} \leqslant 0{,}3—0{,}4$, так как в этом случае с достаточной для практики точностью можно использовать логарифмическую зависимость между понижением уровня и расстоянием и определять коэффициент водопроводимости по графику $S - \lg r$ или формуле Дюпюи. Наблюдательные скважины на смежные горизонты следует закладывать рядом с наблюдательными скважинами на опробуемый горизонт, однако их количество по сравнению с опробуемым горизонтом может быть сокращено. Обязательно одну из наблюдательных скважин, оборудованных на горизонт, из которого может происходить перетекание, располагать рядом с центральной скважиной.

Возмущающих скважин при опробовании водоносных пластов с высокой водопроводимостью может быть несколько. Основное требование к размещению возмущающих скважин заключается

в том, чтобы получать ощутимые понижения во всех наблюдательных скважинах опытного куста от работы каждой возмущающей скважины. Кроме того, должно соблюдаться условие квазистационарности во всех наблюдательных скважинах от работы каждой возмущающей скважины, причем величины контрольного времени наступления квазистационарного режима от каждой возмущающей скважины должны быть сравнительно близкими. Для соблюдения этих условий необходимо стремиться к максимально возможной компактности в расположении возмущающих скважин. Разработка рекомендаций в отношении расположения возмущающих скважин заключается в получении такого расстояния между ними, которым с достаточной для практики точностью можно было бы пренебрегать, относя суммарный дебит системы к одной (наиболее нагруженной) скважине. При этом отпадает также необходимость в расчете приведенного расстояния. При наличии такого критерия компактности в расположении возмущающих скважин можно принимать расстояния до наблюдательных скважин от одной из них. Определим вначале такое отношение расстояния от первой наблюдательной до дальней возмущающей скважины ($r_д$) к расстоянию от первой же наблюдательной до ближней возмущающей скважины ($r_б$), при котором ошибка этого условного обобщения возмущающих скважин не превышала бы некоторой заданной величины. Очевидно, если это условие будет справедливо по отношению к ближней наблюдательной скважине, оно тем более будет справедливо и по отношению к остальным.

Для получения такого критерия зададимся следующим отношением понижений в первой наблюдательной скважине от работы двух возмущающих скважин, расположенных с нею на одном луче, при условии равенства их дебитов и достижения квазистационарности от работы дальней возмущающей скважины; полагая, что такое допущение существенно не скажется на величине определяемых расчетных параметров:

$$\frac{S_д}{S_б} = \frac{\lg \frac{2{,}25at}{r_д^2}}{\lg \frac{2{,}25at}{r_б^2}} = 0{,}85.$$

Выразим далее продолжительность откачки величиной, кратной контрольному времени от работы дальней возмущающей скважины:

$$t = n \cdot t_к$$

$n$ — коэффициент пропорциональности.

Подставляя последнее выражение в предыдущее и решая его относительно $\frac{r_д}{r_б}$, получим:

$$\lg \frac{r_д}{r_б} = 0{,}0883 \lg n + 0{,}0665.$$

Как видно, интересующее нас отношение зависит от продолжительности откачки ($n$). Так, в интервале $n = 4$—$100$ искомое отношение находится в пределах $\frac{r_д}{r_б} = 1{,}3$—$1{,}8$. Заданное условие $\left(\frac{S_д}{S_б} = 0{,}85\right)$ реально только по истечении некоторого времени от начала откачки, в частности, при $n > 2$. В связи с переменностью искомого отношения в течение откачки принимаем минимальную величину, которая оказывается справедливой в начале откачки. Такой величиной для безнапорных горизонтов ($a \approx 5 \cdot 10^3$ м$^2$/сутки) является отношение $\frac{r_д}{r_б} \approx 1{,}3$, которое становится реальным по истечении 1—2 суток от начала откачки. Для напорных пластов ($a = 1 \cdot 10^6$ м$^2$/сутки) можно принять отношение $\frac{r_д}{r_б} \approx 1{,}5$, которое становится реальным по истечении 0,5 суток от начала откачки. Обозначим расстояние между возмущающими скважинами через $\lambda$, полагая, что $r_б = r_1$, а $r_д = r_1 + \lambda$, рекомендуемые расстояния между крайними возмущающими скважинами будут равны: для безнапорных горизонтов $\lambda = 0{,}3r_1$, для напорных горизонтов $\lambda = 0{,}5r_1$.

Эти рекомендации справедливы и для количества возмущающих скважин больше двух, а также для возмущающих скважин с неравными дебитами. В последнем случае ближней к первой наблюдательной должна быть возмущающая скважина с меньшим дебитом.

Результаты численного анализа показали, что при рекомендуемых отношениях погрешности определения коэффициента водопроводимости с использованием первой наблюдательной скважины практически отсутствуют при временном прослеживании и не превышают 15% при определении по формуле Дюпюи по двум наблюдательным скважинам. Погрешность определения коэффициента пьезопроводности не превышает 30%.

Приведенные критерии справедливы, когда откачки проводятся для определения основных гидрогеологических параметров. Ими же можно пользоваться и при оценке условий взаимодействия водоносных горизонтов в слоистых толщах.

При откачках, проводимых для оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод и определения величины $\Delta L$ в водоносных горизонтах, отличающихся крайней неоднородностью как по фильтрационным свойствам, так и по строению руслового аллювия, в ряде случаев целесообразно провести групповую опытную откачку из нескольких скважин, расположенных на линии проектируемого ряда. В этом случае опытные скважины представляют собой как бы элемент будущего водозаборного ряда. Результаты такой откачки могут служить основой для применения гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов подземных вод.

## Характер и степень возмущения

### *Характер возмущения*

Характер возмущения определяет способ обработки и интерпретации опытных данных. Современная методика позволяет обрабатывать результаты опытов, получаемые при скачкообразном, линейном, логарифмическом и более сложном характере возмущения. Это вычисляется с помощью приведенных величин времени, расстояния и понижения. Но при сложном характере возмущения возрастает число расчетных операций, что делает обработку более трудоемкой, снижает точность определяемых параметров, усложняет интерпретацию опытных данных. В связи с этим необходимо стремиться к простому характеру возмущения.

При проведении опытных откачек наиболее желательным является постоянный характер возмущения. Необходимо, чтобы условие постоянства дебита сохранялось на протяжении всего опыта. Откачки с несколькими ступенями дебита следует проводить в основном из разведочно-эксплуатационных скважин для установления зависимости понижения уровня в скважине от ее дебита. Вопрос о необходимом количестве ступеней дебита для установления этой зависимости подробно рассмотрен в работе [147]. В ней отмечено, что в водоносных горизонтах, приуроченных к зернистым отложениям, число ступеней дебита не должно превышать двух. В безнапорных горизонтах, приуроченных к трещиноватым породам, некоторую часть откачек следует провести с тремя ступенями дебита.

Откачки с несколькими ступенями дебита иногда могут проводиться также для определения величины естественной разгрузки подземных вод по методике, описанной в главе 8.

В тех случаях, когда необходимая степень возмущения не достигается одиночным, производят групповое возмущение несколькими возмущающими скважинами. Для обеспечения условия постоянства дебита групповая откачка должна быть компактной и синхронной.

Условие постоянства дебита, реальное для откачек, оказывается нереальным при опробовании водоносных пластов выпусками. При выпусках имеет место условие постоянства понижения. Последнее равно напору над уровнем излива или меньше него. Характер возмущения при выпусках переменный. Закономерность изменения дебита прямолинейна в координатах $\frac{1}{Q} - \lg t$. Выражаемая обычно угловым коэффициентом временно́го графика в указанных координатах, она определяется коэффициентом водопроводимости и величиной напора над уровнем излива и, как правило, не может задаваться по усмотрению исследователя. Обработка результатов выпуска производится с помощью приведенного понижения. Определение параметров прослеживанием восстановления возможно лишь приближенно, поэтому основная информация должна быть получена на стадии понижения по наблюдательным скважинам.

При выпусках осложняется или становится невозможной обработка результатов скачкообразного возмущения, поэтому опробование выпусками должно производиться при максимальном понижении, постоянном в течение всего опыта. Выпуски могут быть групповыми, но по возможности компактными и обязательно синхронными.

Таким образом, при опробовании водоносных горизонтов откачками необходимо стремиться к постоянству расхода, а при выпусках — к постоянству понижения в возмущающих скважинах. При групповом возмущении необходимо обеспечивать компактность в расположении возмущающих скважин и синхронность в их работе. Необходимые рекомендации по размещению возмущающих скважин даны в предыдущем параграфе.

Во всех случаях необходимо избегать нерегулярных колебаний дебита, поскольку погрешности, связанные с этим явлением, практически неустранимы.

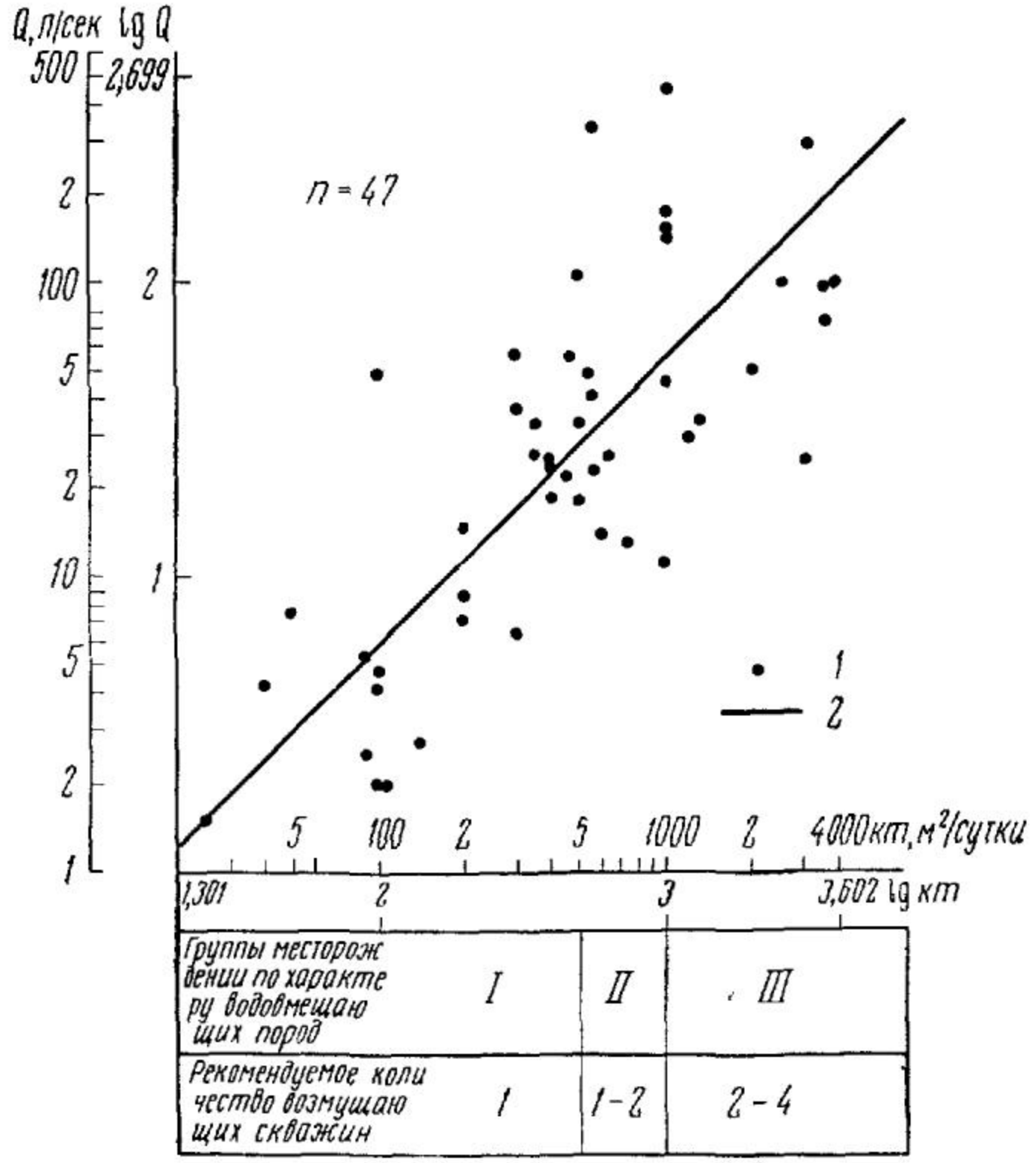
*Степень возмущения*

Степень возмущения наряду с его длительностью определяет размеры фиксируемой части депрессионной воронки и величину напорного градиента в пределах нее. Следовательно, являясь важной характеристикой гидрогеологического опыта, степень возмущения обеспечивает эффективность опытного куста. Под необходимой степенью возмущения понимается, в частности, такой дебит откачки (выпуска), который обеспечивает в возмущающих скважинах понижение $S = 3$ м при опробовании безнапорных и $S_0 = 4$ м при опробовании напорных водоносных горизонтов. Такое понижение при длительности возмущения 5—10 суток и рекомендованной схеме куста обеспечивает разность понижений в соседних наблюдательных скважинах и понижение в наиболее удаленной из них не менее 20 см.

Исходя из рекомендуемого понижения в возмущающих скважинах и указанной примерной длительности возмущения, определен необходимый дебит откачек в наиболее распространенном диапазоне значений коэффициента водопроводимости. Результаты определений показаны на рис. 79 в виде графика зависимости $\lg Q = f(\lg km)$. Для того чтобы задаваться степенью возмущения в пределах рекомендуемых величин, на практике достаточно располагать удельным дебитом, определяемым по результатам пробных откачек. При проектировании нередко отсутствует и этот показатель, поэтому для того, чтобы воспользоваться предложенным графиком, наиболее распространенные водовмещающие породы группируются в три группы по величине коэффициента водопроводимости. Для такой группировки использованы опытные данные по 30 месторождениям подземных вод, проинтерпретированных повторно. Примерную степень возмущения при проектировании опытных работ можно определить, зная характер водовмещающих пород (см. рис. 79).

При опробовании дочетвертичных песков, слабых песчаников и некарстующихся трещинных водовмещающих пород, коэффициенты водопроводимости которых изменяются в пределах 50—500 м²/сутки, рекомендуются дебиты $Q = 5—25$ л/сек.

При опробовании четвертичных аллювиальных песков, аллювиально-пролювиальных песчано-гравийных отложений, трещинно-поровых водовмещающих пород с рассеянным карстом, коэффициенты




| Группы месторождении по характеру водовмещающих пород | I | II | III |
|---|---|---|---|
| Рекомендуемое количество возмущающих скважин | 1 | 1-2 | 2-4 |

Рис. 79. График практикуемой и рекомендуемой степени возмущения в зависимости от величины коэффициента водопроводимости.

*I* — пески и слабые песчаники дочетвертичных отложений, трещинные некарстующиеся водовмещающие породы; *II* — пески аллювиальных и аллювиально-пролювиальных отложений четвертичного возраста, трещинно-поровые горизонты с мелким рассеянным карстом; *III* — галечники и гравийно-галечники с песчаным заполнителем, трещинно-карстовые водоносные горизонты. *1* — точки — по практикуемым значениям дебита, *2* — расчетный график рекомендуемых значений дебита для обеспечения $S_0 = 3$ м в безнапорных и $S_0 = 4$ м в напорных водоносных пластах

водопроводимости которых изменяются в пределах 500—1000 м²/сутки, рекомендуемые дебиты $Q = 25—50$ л/сек.

При опробовании галечников с песчано-гравийным заполнителем и трещинно-карстовых массивов, коэффициенты водопроводимости которых находятся в интервале 1000—3000 м²/сутки, рекомендуются дебиты $Q = 50—150$ л/сек.

Для опытных возмущений на практике широко используют до настоящего времени эрлифты. Расход эрлифтной установки при загрузке смесителя 1 : 1,5, расходе воздуха 7,5 м³/мин (в расчете на передвижной компрессор ДК-9) и при глубинах динамического уровня 10—70 м изменяется в пределах 45—20 л/сек.

Следовательно, при опробовании первой группы водовмещающих пород эрлифтом достаточно одной, второй группы — одной-двух, третьей группы — двух-четырех возмущающих скважин. Опробование более водообильных водоносных горизонтов с водопроводимостью $km > 3000$ м²/сутки является достаточно серьезной технической задачей, связанной с выбором более мощных водоподъемников, энергообеспечения и т. д.

Чтобы проконтролировать реальность рекомендуемой степени возмущения, обратимся к практике опытно-фильтрационных исследований. Для анализа использована охарактеризованная ранее выборка из 47 опытных кустов, данные по которым проинтерпретированы повторно для определения основных расчетных параметров. Во всех случаях исход интерпретации оказался положительным (отрицательный исход в пяти случаях из 47 не связан со степенью возмущения). Практикуемые дебиты откачек и выпусков в зависимости от водопроводимости опробованных водоносных горизонтов нанесены на график на рис. 79. Как видно, опытные точки расположились вытянутым облаком вокруг графика расчетных рекомендуемых дебитов, так что последний является средней для данной опытной совокупности. По результатам анализа выборки, основываясь на положительном исходе интерпретации, можно сделать вывод о том, что практикуемая степень возмущения является достаточной, а рекомендуемая — реальной.

## Продолжительность возмущения

Продолжительность откачек определяется их назначением и гидрогеологическими условиями, но, как правило, не должна превышать 1—2 суток. При необходимости восстановления фильтрационных свойств горизонта (разглинизации) эта продолжительность может быть увеличена. Такую же продолжительность можно принять при проведении опытных одиночных откачек. Значительно большей продолжительностью характеризуются опытные кустовые откачки и особенно опытно-эксплуатационные откачки, что связано с задачами, решаемыми этими видами опытных работ.

Продолжительность возмущения при неустановившемся режиме фильтрации определяет размеры депрессионной воронки, а тем самым и масштабность опробования. Следовательно, чем продолжительнее возмущение, тем больший объем информации заключают результаты опыта. Длительность возмущения контролирует характер временно́й закономерности изменения уровня, а следовательно, и интерпретируемость опытной информации. В пределах отрезка времени, соизмеримого с практикуемой длительностью возмущения,

более поздние участки опытных закономерностей более доступны для интерпретации, нежели начальные. Учитывая стоимость опыта, продолжительность опытного возмущения не должна быть чрезмерной, но рациональной и обоснованной для решения поставленных задач. Вопрос заключается в обосновании рациональной длительности возмущения. Под рациональной понимается такая длительность опытного возмущения, которая при рекомендуемой схеме опытного куста, характере и степени возмущения гарантирует получение регулярной, сравнительно легко интерпретируемой опытной закономерности изменения уровня. Такой относительно легко интерпретируемой, как показано ранее, является закономерность изменения уровня при квазистационарном режиме фильтрации. Располагая опытной информацией, полученной при этом режиме, можно воспользоваться для ее обработки способами временно́го, площадного и комбинированного прослеживания, позволяющими квалифицировать определяемые параметры относительно однозначно. Следовательно, основной целью опытного возмущения при неустановившемся режиме фильтрации должно быть достижение квазистационарности в заданной области. Последняя определяется расстоянием от возмущающей до наиболее удаленной наблюдательной скважины в опытном кусте.

С точки зрения времени наступления квазистационарного режима целесообразно выделить случаи с вероятным запаздыванием квазистационарности и без такого запаздывания. Случаи без вероятного запаздывания квазистационарности имеют место при опробовании напорных водоносных горизонтов в поровых средах. Запаздывание квазистационарности вероятно в безнапорных поровых водоносных горизонтах, где оно связано с проявлением эффекта Болтона, и в трещинных напорных и безнапорных водоносных горизонтах, в которых это явление связано с эффектом двойной пористости. Специфика указанных случаев должна приниматься в расчет при назначении необходимой длительности возмущения, поэтому следует рассматривать их порознь. Кроме того, нужно учитывать специфические особенности при назначении продолжительности откачек, проводимых для изучения взаимосвязи водоносных горизонтов, поверхностных и подземных вод, а также опытно-эксплуатационных откачек в сложных гидрогеологических условиях.

*Продолжительность возмущения при опробовании зернистых напорных водоносных горизонтов для определения основных параметров*

Конечной целью опытного возмущения в зернистом напорном горизонте является достижение квазистационарного режима в наиболее удаленной скважине опытного куста. Контрольное время наступления квазистационарного режима определяется из возможности замены экспоненциальной функции понижения логарифмической при значении аргумента $\frac{r^2}{4at} < 0{,}1$ [143]. Погрешность такой аппроксимации составит 5,7%.

Длительность возмущения, равная контрольному времени для дальней наблюдательной скважины, обеспечивает возможность площадного прослеживания с использованием всех наблюдательных скважин куста на конечный момент времени. Чтобы убедиться в параллельности площадных графиков (признак квазистационарности), необходимо строить их на два-три момента времени. Ограничение длительности возмущения величиной контрольного времени для дальней наблюдательной скважины допускает возможность площадного прослеживания при нескольких моментах времени. Например, если момент раннего прослеживания принять равным $0{,}5t_к$, т. е. $\frac{r^2}{4at} \leqslant 0{,}2$ по дальней наблюдательной скважине, то погрешность аппроксимации не превышает 15% в одной, дальней точке, что практически не отразится на форме площадного графика. Рекомендуемая длительность возмущения обеспечивает возможности для временно́го и комбинированного прослеживания. Временно́е прослеживание может быть представительным при длительности возмущения, существенно превышающей контрольное время. По опыту известно, что осреднение опытных точек наиболее представительно при пятикратном превышении контрольного времени. Кроме наиболее удаленной, это условие обычно выполняется при рекомендуемой длительности во всех остальных наблюдательных скважинах опытного куста.

Исходя из условия получения фиксируемого понижения в наиболее удаленной наблюдательной скважине, расстояние до нее ограничивается $r \leqslant 1500$ м. Отсюда длительность возмущения при наиболее часто встречающемся диапазоне значений пьезопроводности составит 6—11 суток.

*Продолжительность возмущения при опробовании зернистых безнапорных водоносных горизонтов для определения основных параметров*

Конечной целью опытного возмущения в безнапорном зернистом, как и в напорном водоносном горизонте, является достижение квазистационарного режима в наиболее удаленной наблюдательной скважине опытного куста. Длительность возмущения, равная контрольному времени для наиболее удаленной наблюдательной скважины при опробовании безнапорных водоносных горизонтов, является необходимой, но недостаточной, поскольку квазистационарный участок опытной закономерности может проявляться с ощутимым запаздыванием вследствие вероятного проявления эффекта Болтона. Но запаздывание квазистационарного участка является величиной аналитически непрогнозируемой. Однако известно, что величина запаздывания обратно пропорциональна удаленности наблюдательной скважины от возмущающей, следовательно, она обратно пропорциональна и величине контрольного времени. Величина запаздывания в наиболее удаленной скважине опытного куста значительно

меньше контрольного времени и в рассмотренных примерах не превышает двух суток, т. е. является достижимой при практикуемой длительности возмущения. Непосредственным признаком необходимой и достаточной длительности опытного возмущения будет выход комбинированных графиков нескольких скважин на общую асимптоту.

В главе 5 было показано, что эффект Болтона проявляется далеко не всегда при опробовании безнапорного горизонта. В тех случаях, когда он практически не проявляется, необходимая и достаточная длительность опытного возмущения, как и в напорном водоносном горизонте, будет равна контрольному времени для наиболее удаленной наблюдательной скважины опытного куста. Непосредственным признаком простой закономерности изменения уровня (без запаздывания) является выход комбинированных графиков разноудаленных наблюдательных скважин на общую асимптоту практически по истечении контрольного времени. С получением такого графика опыт можно считать завершенным. В этом случае, как и при опробовании напорных водоносных горизонтов, протяженность опытного возмущения, равная контрольному времени для дальней наблюдательной скважины, является необходимой и достаточной, поскольку позволяет строить площадные графики в интервале времени $t = (0{,}5—1)\,t_к$, обеспечивая их параллельность. Определим порядок величин длительности опытного возмущения при опробовании безнапорных водоносных горизонтов. Из соображений представительности понижения в дальней наблюдательной скважине опытного куста ее следует располагать не далее 150 м от возмущающей скважины, тогда при средней уровнепроводности $a = 5 \cdot 10^3$ м²/сутки контрольное время составит $t_к = 11$ суток. При простых опытных закономерностях длительность опытного возмущения ограничивается этой величиной, при проявлении эффекта Болтона она должна быть увеличена на величину вероятного запаздывания. Исходя из имеющихся примеров и с некоторой гарантией можно принять необходимую длительность возмущения примерно равной 15 суткам.

*Продолжительность возмущения при опробовании трещинных напорных и безнапорных водоносных горизонтов для определения основных параметров*

В трещинных фильтрационных средах запаздывание квазистационарных участков опытных закономерностей связано с эффектом двойной пористости. В отличие от поровых горизонтов запаздывание в трещинных средах может быть независимо от характера водоносного горизонта, т. е. как в безнапорных, так и в напорных горизонтах. Как и при эффекте Болтона, величина запаздывания квазистационарного участка при эффекте двойной природы скважности аналитически непрогнозируема, но в большинстве случаев достижима практикуемой длительностью опытного возмущения. Следовательно,

конечной целью гидрогеологических опытов при опробовании трещинных напорных или безнапорных водоносных горизонтов является достижение квазистационарных участков в опытных закономерностях изменения уровня. Непосредственным показателем необходимой и достаточной длительности опытного возмущения будет выход комбинированных графиков разноудаленных наблюдательных скважин на общую асимптоту. Однако это характерно для трещинных относительно равномерно проницаемых фильтрационных сред. Форма комбинированных графиков в этом случае и в случае с эффектом Болтона аналогична. В сильно проницаемых, как правило, в трещинно-карстовых водоносных горизонтах, выход на общую асимптоту не обязателен. Признаком необходимой и достаточной длительности возмущения является параллельность комбинированных графиков разноудаленных наблюдательных скважин. Эффект двойной пористости проявляется не всегда при откачках из трещиноватых пород, поэтому при опробовании трещинных водоносных горизонтов запаздывание квазистационарного участка практически не проявляется. В этих случаях необходимая и достаточная длительность опытного возмущения определяется контрольным временем для наиболее удаленной наблюдательной скважины опытного куста. Как и для зернистых водоносных горизонтов, примерная длительность возмущения будет порядка 10 суток.

При заметном запаздывании представительных участков длительность опытного возмущения должна быть увеличена на величину этого запаздывания. Представление о порядке величин запаздывания можно получить, анализируя конкретные примеры опытных закономерностей, полученных при опробовании трещинных водоносных горизонтов. При таком анализе из отрезка времени до выхода графика на асимптоту бывает трудно выделить величину контрольного времени или величину запаздывания в отдельности, поэтому имеет смысл ориентироваться на суммарный отрезок времени $(t_к + \tau)$. Эта величина в рассмотренных примерах не превышает 13 суток. *С учетом некоторого запаса примерная продолжительность опытного* возмущения при опробовании трещинных водоносных горизонтов составит 15 суток.

### *Продолжительность опытных откачек для оценки степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод*

Как было показано в главе 9, наиболее надежные данные для оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод и для определения гидравлического сопротивления русловых отложений могут быть получены только при стационарном режиме движения подземных вод. В связи с этим продолжительность опытной откачки должна по возможности обеспечивать представительный участок со стационарным режимом подземных вод. Время стабилизации движения определяется расстоянием от центральной скважины до реки, коэффициентом уровнепроводности опробуемого горизонта,

его водопроводимостью и коэффициентом сопротивления экранирующего заиленного слоя. Опыт проведения откачек в условиях взаимосвязи подземных и поверхностных вод показал, что в природных условиях время стабилизации режима колеблется довольно в значительных пределах: от нескольких часов до нескольких десятков суток. Особенно длительны процессы неустановившейся фильтрации в речных долинах, где эксплуатируемый водоносный горизонт отделен от реки другим водоносным горизонтом.

В связи с тем что степень взаимосвязи подземных и поверхностных вод оказывает решающее влияние на выбор схемы водозабора и его положение относительно реки, опытные откачки для первоначального решения этого вопроса следует проводить на стадии предварительной разведки. Для сокращения продолжительности откачки на этой стадии желательно проводить на небольших расстояниях от реки (до 20—30 м), так как при таком положении возмущающей скважины можно ожидать стабилизацию режима в течение 10—15 суток. Откачки для уточнения величины сопротивления русловых отложений проводятся на стадии детальной разведки при расположении опытных скважин по линии проектируемого водозабора. В этом случае продолжительность опытных работ, которые также следует проводить до стационарного режима, определяется расчетом по значениям параметров, определенных на стадии предварительной разведки, и уточняется в процессе опытов.

*Продолжительность опытных откачек для оценки взаимодействия водоносных горизонтов в двухслойной и многослойной толщах*

Продолжительность опытных откачек в двухслойной толще определяется временем, при котором могут быть зафиксированы значительные понижения уровня в верхнем питающем слое. Наиболее часто в двухслойной водоносной толще верхний водоносный горизонт представлен песками, обладающими сравнительно высокой водоотдачей (0,1—0,15) и являющимися вполне проницаемыми (коэффициенты фильтрации 0,1—1,0 м/сутки). В этих условиях продолжительность опытных откачек порядка 10—15 суток является вполне достаточной для качественной оценки степени взаимосвязи между водоносными горизонтами. При рекомендованной продолжительности по изложенной в главе 7 методике можно определить все необходимые параметры как при наличии конечных участков временных закономерностей изменения уровня, так и при их отсутствии. В неблагоприятных случаях, при проницаемости верхнего водоносного горизонта $10^{-2}$—$10^{-3}$ м/сутки, продолжительность откачек должна быть увеличена до 20—30 суток.

Оценку степени взаимодействия водоносных горизонтов в многослойной толще с выдержанными разделяющими слабопроницаемыми слоями следует проводить только в тех случаях, когда коэффициенты фильтрации разделяющих отложений более $10^{-4}$ м/ сутки, а их мощность не превышает 20—30 м. При этом для установления наличия

перетекания и определения параметров перетока необходимо провести опытную откачку продолжительностью 30—40 суток. Такую откачку желательно проводить при большом понижении уровня. Поэтому при значительной водопроводимости водоносного горизонта целесообразно проводить откачку из нескольких скважин. Так как рекомендуемая откачка является дорогостоящей, ее проводят только при наличии существенных геологических предпосылок для перетекания.

Обратимся к анализу практикуемой длительности опытного возмущения. Для этого воспользуемся выборкой из 50 опытных кустов. Характеристика выборки дана ранее. Анализируемая выборка представляет широкий диапазон природных условий: поровые и трещинные фильтрационные среды с проявлением запаздывания квазистационарных участков и без него, с влиянием граничных факторов аномальности в «чистом виде» и в сочетании с эффектом запаздывания и т. д. Для всех случаев выполнена повторная интерпретация опытных данных в соответствии с изложенными принципами. В 45 случаях исход интерпретации положительный, в 5 случаях — отрицательный, причем не связан с длительностью возмущения. Анализ каждого случая в отдельности показывает, что задаваемая длительность опытного возмущения практически не зависит ни от сложности природных условий, определяющих интерпретируемость опытной информации, ни от метода прогнозного расчета. Отмечается лишь определенная зависимость назначаемой длительности возмущения от стадии исследований. Все это позволяет заключить, что длительность опытного возмущения задается в значительной степени произвольно. Статистический анализ выборки, выполненный с помощью вероятностного графика, обнаруживает, что распределение практикуемой длительности не противоречит логнормальному закону (см. рис. 78, а). Среднегеометрическое выборки $\tilde{C} = 17$, стандартный множитель $\varepsilon = 2{,}6$, ошибка среднего $\sigma_{\bar{x}} = 2{,}3$. Наиболее вероятным принимается среднегеометрическое из практикуемых с поправкой за ограниченность выборки, т. е. длительность примерно 20 суток. Поскольку исход интерпретации был положительным, указанную практикуемую длительность возмущения можно считать достаточной. Результаты анализа практикуемой длительности подтверждают реальность рекомендуемой длительности возмущения.

Все сказанное о необходимой и достаточной длительности опытного возмущения заставляет усматривать в этом вопросе два аспекта. Первый касается определения конечной цели опытного возмущения и момента для его прекращения по достижении этой цели. Второй аспект заключается в определении проектной длительности. Разумеется, основное внимание при решении этого вопроса должно быть уделено первому, поскольку он определяет размер реальных затрат на производство опыта. Как уже говорилось, конечной целью опытного возмущения является получение регулярной, относительно легко интерпретируемой опытной закономерности изменения уровня. Такими являются закономерности, получаемые при стационарном

и квазистационарном режимах фильтрации. Последние обладают вполне определенными признаками и поэтому диагностируются при оперативной документации опытного возмущения. Проектная длительность возмущения может быть весьма ориентировочной и подлежит обязательному уточнению в процессе проведения опыта по результатам оперативной документации. В качестве проектных можно воспользоваться предлагаемыми рекомендациями.

Оперативная документация гидрогеологических опытов заключается: а) в повременном фиксировании дебита и динамического уровня в табличной и графической форме (в линейном масштабе); б) в построении временных, а при необходимости — комбинированных и площадных графиков прослеживания изменения уровня и временных графиков прослеживания дебита.

## Особенности проведения опытно-эксплуатационных откачек (выпусков)

Опытно-эксплуатационные откачки проводятся в сложных гидрогеологических условиях, когда граничные условия месторождения и характер неоднородности не могут быть четко установлены обычным комплексом разведочных работ и представлены затем в виде той или иной фильтрационной схемы, которая может быть рассчитана аналитически, на ЭВМ или реализована на модели.

При такой откачке должны учитываться специфические особенности ее назначения.

Расход опытно-эксплуатационной откачки по возможности подбирается близким к расходу проектного водозабора, что обычно достижимо на небольших месторождениях подземных вод с высокими фильтрационными свойствами водовмещающих пород. Когда выполнение этого условия связано с большими материальными затратами (необходимость опробования одновременно большого числа скважин), расход опытно-эксплуатационной откачки задается с учетом величины понижения уровня и темпа его изменения во времени. При этом величина расхода не должна быть меньше 30—50% от расхода будущего водозабора. Опытно-эксплуатационные откачки часто проводятся на участках с ограниченными естественными ресурсами. Тогда их целесообразно проводить при двух ступенях возмущения, различающихся приблизительно в 2—2,5 раза. Причем дебит при первой ступени откачки должен быть близок или превышать величину естественных ресурсов. Откачка со ступенчатым расходом позволяет определить величину обеспеченного питания (по методике, изложенной в главе 8). Как при одноступенчатой, так и при двухступенчатой откачке желательно поддерживать постоянный расход в процессе каждой ступени.

При откачке из группы скважин это легко достигается при разновременном включении возмущающих скважин. Возмущающие разведочные и разведочно-эксплуатационные скважины должны располагаться в точках заложения будущих эксплуатационных сква-

жин. Расстояния между возмущающими скважинами должны выбираться с учетом возможности достижения их взаимодействия. Соблюдение этого условия не требуется, когда предполагается стабильный режим уровней при откачке. Вопрос об условиях взаимодействия отдельных пар возмущающих скважин решается обычно при их предварительном одиночном опробовании.

Схема расположения наблюдательных скважин выбирается в каждом конкретном случае с учетом количества и местоположения возмущающих скважин и гидрогеологической обстановки в пределах опробуемого участка. В общем случае целесообразно иметь наблюдательную скважину возле каждой возмущающей и между ними. Лучи из двух-четырех наблюдательных скважин должны быть направлены в сторону выявленных и предполагаемых границ участка. При наличии в кровле опробуемого пласта обводненных или слабопроницаемых отложений на них следует оборудовать две-три наблюдательные скважины.

Наиболее сложно выбрать продолжительность опытно-эксплуатационного возмущения. В практике проведения разведочных гидрогеологических изысканий продолжительность таких откачек обычно один-три месяца, редко пять-семь месяцев и более.

При определении продолжительности опыта следует исходить из следующих основных требований.

1. Во всех возмущающих и наблюдательных скважинах должен быть достигнут квазистационарный режим изменения уровня. Исключение могут составлять лишь удаленные наблюдательные скважины.

2. Квазистационарный режим должен быть достигнут с учетом взаимодействия всех возмущающих скважин. Это условие соблюдается при параллельности графиков изменения уровня во времени по всем скважинам в центральной зоне опытного куста, построенным в координатах $S - \lg t$ или других координатах, обеспечивающих прямолинейный характер графиков.

3. В процессе откачки в закономерности изменения уровня должны найти отражение все ближайшие к опытному кусту выявленные и предполагаемые границы.

Эти требования следует также учитывать при определении продолжительности откачек в полосообразных и круговых пластах. Проналжительность опытно-эксплуатационных откачек, как правило, не должна превышать трех-четырех месяцев. Это надо учитывать при выборе схемы опытного куста. Опытно-эксплуатационные откачки должны проводиться в период меженного стояния уровня подземных вод.

Если в процессе эксплуатации предполагается осушение того или иного обводненного интервала водоносного горизонта, при опробовании скважины он должен быть перекрыт глухими трубами.

### Оборудование возмущающих и наблюдательных скважин

Метод Джейкоба, рекомендованный для обработки опытных данных, предназначен для совершенных скважин, поэтому несовершенство возмущающих и наблюдательных скважин может быть фактором аномальности опытных закономерностей изменения уровня. В связи с этим при оборудовании опытного куста следует предусмотреть такое размещение фильтров скважин в разрезе опробуемого горизонта, чтобы свести к минимуму возможные деформации опытных закономерностей за счет несовершенства скважин. Очевидно, наиболее правильным было бы оборудовать совершенные опытные кусты, в которых возмущающие и наблюдательные скважины вскрывали бы водоносный горизонт фильтрами со скважностью 10—20% на полную мощность [169]. Но выполнение этого условия реально при опробовании водоносных горизонтов малой мощности. Практически, при опробовании достаточно мощных водоносных горизонтов это требование невыполнимо и, вообще говоря, не обязательно. Деформирующее влияние несовершенства в достаточной для практики степени можно устранить определенным размещением наблюдательных скважин в плане и их фильтров в разрезе относительно фильтра возмущающей скважины. Так, например, несовершенство возмущающей скважины оказывает незначительное влияние на опытную закономерность изменения уровня в наблюдательной скважине, отстоящей от возмущающей на расстояние, равное или несколько меньшее мощности опробуемого горизонта, если фильтр наблюдательной расположен против фильтра возмущающей скважины. При более близком расположении наблюдательных скважин влияние несовершенства устраняется введением поправок по Н. Н. Веригину.

Таким образом, возмущающие и наблюдательные скважины опытного куста могут быть несовершенными, но необходимым условием является такое расположение фильтров, чтобы поперечные оси фильтров всех скважин куста располагались примерно в одной плоскости. При опробовании безнапорных и напорных горизонтов с горизонтальным или пологим залеганием, эта плоскость должна быть горизонтальной, а в наклонных горизонтах, если это возможно, — совпадать с плоскостью напластования. Желательно, чтобы осевая плоскость фильтров совпадала с осевой плоскостью водоносного горизонта. Разумеется, в изотропных пластах возможно было бы отступление и от этого требования, но в большинстве случаев судить о степени вертикальной анизотропии поровых горизонтов по результатам бурения бывает затруднительно, поэтому необходимо во всех случаях стремиться к указанному расположению фильтров в разрезе. Несоблюдение этого в анизотропных водоносных горизонтах иногда приводит к существенным ошибкам в определении основных параметров способами временного и площадного прослеживания. Величина ошибки возрастает с удалением фильтров наблюдательных скважин от края фильтра возмущающей скважины,

достигая двух-трехкратного превышения истинной величины. В примере, изображенном на рис. 43, ошибка в определении $km$ способом площадного прослеживания на момент $t = 21$ ч при удалении пьезометров на 30 м от верхнего края фильтров составила 100%.

Оборудование опытных кустов требует особенного внимания при суммарном опробовании сложнослоистых толщ (см. рис. 51), обладающих большой вертикальной анизотропией. Для получения суммарных параметров проницаемых элементов таких анизотропных разрезов необходимо их совершенное по степени вскрытие возмущающими и наблюдательными скважинами. При ограниченных возможностях необходимо оборудовать фильтрами по крайней мере основные проницаемые элементы слоистого разреза или обеспечить гравийную засыпку по всей фильтровой колонне ниже уровня подземных вод. Неупорядоченное положение фильтров наблюдательных скважин в разрезе сложнослоистой толщи относительно фильтров возмущающих скважин имеет результатом рассеяние точек на площадных графиках, что само по себе может служить критерием допустимости использования опытной информации, полученной по несовершенным опытным кустам. При упорядоченном положении фильтров наблюдательных скважин, когда вскрывается только часть проницаемых элементов разреза, появляется положительная аномалия временных и комбинированных графиков прослеживания.

Диаметр фильтровой колонны возмущающих скважин зависит от диаметра водоподъемника, обеспечивающего необходимую степень возмущения. Поскольку на практике чаще всего используются эрлифты, то в зависимости от водопроводимости опробуемых горизонтов, диаметры фильтровых колонн изменяются от 146 мм до 14″. При достаточно глубоком положении фильтров фильтровая колонна является одновременно и водоподъемной. При определении глубины возмущающих скважин, кроме необходимости вскрытия и оборудования соответствующих интервалов водоносного горизонта, следует руководствоваться необходимостью обеспечения загрузки смесителя порядка 1 : 1,5. При назначении диаметра наблюдательных скважин следует исходить из диаметра измерительной аппаратуры и оборудования для производства прокачек или пробных откачек. Основной задачей опытного возмущения является создание фиксируемого градиента напора в заданной области.

В настоящей главе были приведены только самые общие рекомендации по методике проведения опытных работ. Вместе с тем мы считаем необходимым еще раз отметить, что в любых природных условиях при назначении продолжительности опытных работ, ступеней дебита, количества и характера расположения наблюдательных скважин и т. д. необходимо исходить из назначения откачек, и по возможности проводить специальные расчеты, принимая ориентировочные значения параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Альтшулер Л. М. Аналитическое определение температурного поля трубы в полубесконечном массиве. Тепло- и массоперенос, Изд-во АН БССР, т. V, 1963.

2. Бабушкин В. Д. Неустановившийся приток воды к выработке в водоносном пласте, ограниченном со всех сторон породами другой проницаемости, в условиях напорно-безнапорной фильтрации. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 10, 1968, с. 21—47.

3. Бан А. Определение времени запаздывания восстановления давления в трещиноватой породе. — «Изв. АН СССР, отд. технолог. наук (Механика и машиностроение)», 1961, № 4, с. 38—42.

4. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М. Гостоптехиздат, 1962, 275 с. Авт.: Бан А., Богомолова А. Ф., Максимов В., Николаевский В. Н., Огаджанян В. Г., Рыжик В. М.

5. Об определении параметров нефтяного пласта по данным о восстановлении давления в остановленных скважинах. — «Изв. АН СССР, отд. техн. наук», 1957. № 11, с. 84—91. Авт.: Баренблатт Г. И., Борисов Ю. П., Каменский С. Г., Крылов А. П.

6. Баренблатт Г. И., Максимов В. А. О влиянии неоднородностей на определение параметров нефтеносного пласта по данным нестационарного притока жидкости к скважинам. — «Изв. АН СССР, отдел технических наук», 1958, № 7.

7. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П., Кочина И. П. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. Прикладная математика и механика. — «Изв. АН СССР, Новая серия», т. XXIV, вып. V, 1960, с. 852—864.

8. Баренблатт Г. И., Желтов Ю. П. Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах. — «Докл. АН СССР», 1960, т. 132, № 3, с. 545—548.

9. Биндеман Н. Н. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами, нагнетаниями. М., Углетехиздат, 1951, с. 52.

10. Биндеман Н. Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1963, 203 с.

11. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Издание 2-е. М., «Недра», 1970, 215 с.

12. Боревский Б. В., Гродзенский В. Д. Опыт определения источников формирования эксплуатационных запасов подземных вод в закрытых структурах трещинно-карстового типа по данным эксплуатации водозабора. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 32, 1969, с. 86—92.

13. Боревский Б. В. Учет естественных колебаний уровня подземных вод при обработке результатов опытных откачек. «Разведка и охрана недр», 1969, № 10, с. 45—47.

14. Боревский Б. В., Язвин Л. С., Пересунько Д. И. Влияние осреднения фильтрационных параметров на точность гидрогеологических прогнозов. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 32, 1970, с. 33—50.

15. Боревский Б. В. Особенности определения расчетных гидрогеологических параметров трещиноватых пород. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 45, 1971, с. 41—55.

16. Боревский Л. В. Определение расчетных гидрогеологических параметров водоносных горизонтов зоны выветривания. «Разведка и охрана недр», 1966, № 3, с. 44—47.

17. Боревский Л. В., Язвин Л. С. К методике определения гидрогеологических параметров в неоднородных в плане пластах. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 32, 1970, с. 51—56.

18. Борисов Ю. П. Учет неоднородности пласта при проектировании разработки нефтяной залежи. — «Тр. ВНИИ», вып. XXI, 1959, с. 85—92.

19. Бочевер Ф. М. О постановке опытных откачек в условиях неустановившегося движения для определения гидрогеологических параметров. «Разведка и охрана недр», 1956, № 12, с. 47—51.

20. Бочевер Ф. М. Типизация гидрогеологических условий для целей расчета эксплуатационных запасов подземных вод. «Советская геология», 1958, № 9, с. 128—140.

21. Бочевер Ф. М., Цюрупа П. В. Прогноз притока и снижений уровней подземных вод при осушении месторождений полезных ископаемых. «Разведка и охрана недр», 1958, № 5, с. 45—52.

22. Бочевер Ф. М., Веригин Н. Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. М., Госстройиздат, 1961, с. 199.

23. Бочевер Ф. М. Расчет притока подземных вод к водозаборным сооружениям с учетом осушения пласта в области выхода его на поверхность. — «Изв. АН СССР, отдел технических наук (механика и машиностроение)», 1961, № 4, с. 164—166.

24. Бочевер Ф. М., Орфаниди К. Ф. Опыт определения исходных гидрогеологических параметров для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО», сб. 4, 1962, с. 50—68.

25. Бочевер Ф. М. К расчетам скважин в неглубоких напорных водоносных пластах артезианских бассейнов. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО», вып. 6 (гидрогеология), 1964, с. 26—38.

26. Бочевер Ф. М., Глыбов М. М. Оценка заиленности и неоднородности русловых отложений по данным откачек. «Разведка и охрана недр», 1966, № 2, с. 44—49.

27. Бочевер Ф. М. Оценка производительности береговых водозаборов с учетом несовершенства речных русел. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО», вып. 13 (гидрогеология), 1966, с. 28—54.

28. Бочевер Ф. М., Лапшин Н. Н., Хохлатов Э. М. Расчет притока подземных вод к скважинам в долинах рек. «Разведка и охрана недр», 1968, № 9, с. 44—49.

29. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1968, с. 324.

30. Основы гидрогеологических расчетов. М., «Недра», 1969. Авт.: Бочевер Ф. М., Гармонов И. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М. с. 368.

31. Бочевер Ф. М., Лапшин Н. Н. К вопросу о гидрогеологических расчетах водозаборных скважин в слоистых толщах. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО», вып. 22 (гидрогеология), 1969, с. 37—45.

32. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. М., Госстройиздат, 1961, с. 120.

33. Ветров А. Г., Добряков В. Н. Об использовании кумулятивной кривой частот при обработке наблюдений. — В кн.: Вопросы разведочной геофизики, вып. 1. М., Гостоптехиздат, 1962, с. 49—55.

34. Гавич И. К. Некоторые вопросы неустановившейся фильтрации в анизотропных пластах. М., «Энергия», 1966 («Тр. координационных совещаний по гидротехнике», вып. XXV.) с. 272—285.

35. Гасс П. М. Определение параметров пластов по барометрической эффективности. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 2, 1967, с. 41—54.

36. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившемся дебите и понижениях. М., Гослеолтехиздат, 1950, с. 136.

37. Гольдберг В. М. К вопросу обработки материалов опытной откачки.— «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 1, 1967, с. 25—27.
38. Грабовников В. А., Зильберштейн Б. М. Оценка эксплуатационных запасов на основе обобщенных параметров. «Разведка и охрана недр», 1966, № 5, с. 43—48.
39. Грабовников В. А., Зильберштейн Б. М. Опыт оценки эксплуатационных запасов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях на осиове обобщенных параметров. — «ОНТИ ВИЭМС, экспресс-информация. Серия Гидрогеология и инженерная геология», 1970, №19, с. 15.
40. Григорьев В. М. Расчет подрусловых инфильтрационных водозаборов. — «Тр. ВНИИ ВОДГЕО». Вып. 13 (гидрогеология), 1966, с. 66—83.
41. Грикевич Э. А. Определение гидрогеологических параметров пласта по данным кратковременных откачек. «Разведка и охрана недр», 1963, № 3, с. 43—46.
42. Грикевич Э. А. К расчету гидрогеологических параметров по наблюдательным скважинам. — «Изв. АН Латвийской ССР», 1966, № 7, с. 39—44.
43. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. Рига, «Зинанте», 1969, с. 245.
44. Гусейн-Заде М. А. Особенности движения жидкости в неоднородном пласте. М., «Недра», 1965, с. 276.
45. Гылыбов М. М. Расчет водопонижения и притока к скважинам в клинообразных пластах. — «Докл. Болгарской АН». 1965, т. 18, № 8, с. 763—766.
46. Гылыбов М. М. Определение гидрогеологических параметров пласта в условиях неустановившегося движения подземных вод. — «Изв. ВУЗов», 1966, № 7, с. 87—93.
47. Гылыбов М. М., Моллов Д. О точности и применимостн метода «дополнительного слоя» для учета сопротивления ложа водоемов при гидрогеологических расчетах. — «Изв. Болгарского Геологического общества», 1969, т. XXX, кн. 3, с. 331—339.
48. Елманова Н. М., Язвин Л. С. Опыт применения гидравлического метода оценки эксплуатационных запасов термальных вод. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 10, 1968, с. 95—105.
49. Ефремочкин Н. В. Оценка гидрогеологических параметров при совместном опробовании двух водоносных пластов с различным положением статических уровней. — «Изв. ВУЗов». Геология и разведка, 1968, № 8, с. 87—92.
50. Желтов Ю. П. Об учете сжимаемости пористой среды при фильтрации в ней однородной жидкости. — «Тр. ВНИИнефти», вып. 37, 1962, с. 92—97.
51. Желтов Ю. П., Кутляров В. С. Определение параметров пласта с двойной пористостью по наблюдениям нестационарной фильтрации. В кн.: Гидродинамические исследования пластов и скважин. Баку, АзИНТИ, 1967, с. 37—40.
52. Журавель Н. А. Учет плановой фильтрационной неоднородности при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. «Разведка и охрана недр», 1970, № 10, с. 47—49.
53. Зеегофер Ю. О., Шестаков В. М. Методика обработки данных опытных откачек вблизи реки. «Разведка и охрана недр», 1968, № 9, с. 38—44.
54. Зеегофер Ю. О. Особенности определения гидрогеологических параметров в грунтовых горизонтах большой мощности. — «Бюлл. МОИП, отд. геологич.», 1970, № 3, 146с.
55. Зеленин И. В. Об оценке водопроводимости по формуле Дюпюи— «Изв. ВУЗов». Геология и разведка. 1968, № 5, с. 110—112.
56. Иванов А. В. Некоторые особенности определения водопроводимости в ограниченных пластах по результатам восстановления уровня. —В кн.: «Материалы 2-ой конференции молодых ученых ВСЕГИНГЕО». Изд. ВСЕГИНГЕО, 1970, с. 77—82.
57. Ивашков В. В. Гидрогеологические расчеты водопонижающих

скважин, расположенных вблизи замкнутой границы пласта (на примере месторождений КМА). — «Изв. ВУЗов». Геология и разведка, 1966, № 1, с. 108—114.

58. Игнатович Н. К. Методика пробных и опытных откачек. ОНТИ, 1935, 56 с.

59. Оценка точности определения водопроницаемости горных пород. «Наука», 1971, 150 с. Авт.: Ильин Н. И., Черныпев С. Н., Дзекцер Е. С., Зильберг В. С.

60. Каменский Г. Н. Поиски и разведка подземных вод. М., Госгеолиздат, 1947, 313 с.

61. Керкис Е. Е. Об оценке водообильности водоносных горизонтов. «Тр. Лаборат. гидрогеологических проблем АН СССР», т. 3, 1948.

62. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. М., Углетехиздат, 1955. 100 с.

63. Керкис Е. Е. Определение коэффициента водопроницаемости горных пород комбинированным методом откачки — нагнетания. «Советская геология», 1956, сб. 56, с. 82—90.

64. Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. М., «Мир», 1964, 349 с.

65. Коль С. А. Графоаналитический метод определения коэффициента фильтрации водоносных пород по результатам откачки воды из одиночной скважины. — «Тр. Гидроэнергопроекта», № 6, 1940.

66. Коль С. А. Графоаналитический метод определения коэффициента фильтрации горных пород по результатам откачки воды на фильтрационном участке и некоторые вопросы, связанные с его применением. — «Тр. Гидроэнергопроекта», № 9, 1941.

67. Ковалев В. М. О продолжительиости откачки при опробовании безнапорных водоносных горизонтов. «Разведка и охрана недр», 1966, № 9, с. 41—42.

68. Ковалев Ю. С. К методике проведения одиночных откачек из безнапорных горизонтов. — «Разведка и охрана недр», 1966, № 9, с. 42—44.

69. Ковалевский В. С., Колядa М. Н. К вопросу об определении гидрогеологических параметров водоиосных горизонтов по данным наблюдений за режимом подземных вод и атмосферного давления. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 2, 1967, с. 55—66.

70. Коноплянцев А. А., Ковалевский В. С., Семенов С. М. Естественный режим подземных вод и его закономерности. М., Госгеолтехиздат, 1963, с. 231.

71. Кулибаба Ф. Б. Зависимость результатов опытных откачек от качества предварительной прокачки скважин. «Разведка и охрана недр», 1960, № 3, с. 42—44.

72. Кутляров В. С. Об определении параметров трещиновато-пористых пластов по данным нестационарного притока жидкости к скважинам. — «Тр. ВНИИ», вып. L, 1967, с. 109—117.

73. Максимов В. А. О влиянии неоднородностей на определение параметров. — «Изв. АН СССР», о. т. н., 1959, № 3.

74. Максимов В. А. О влиянии неоднородностей на определение нараметров нефтяного пласта по данным нестационарного притока жидкости к скважинам. Случай двухслойного пласта. — «Изв. АН СССР», 1960, № 3.

75. Максимов В. А. О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде. СО АН СССР. — «ПМТФ», 1962, № 3, с. 76—85.

76. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1949, с. 628.

77. Медведский Р. И. О форме кривых восстановления давления в нагнетательных скважинах трещиноватого коллектора. — «ПМТФ», 1966, № 6, с. 105—107.

78. Мезенцев О. К., Ратников В. М., Скороспелкии С. А. Статистическая обработка данных геохимических поисков. «Разведка и охрана недр». 1964, № 10, с. 29—35.

79. Методические рекомендации по изучению режима поверхностных и подземных вод в карстовых районах. Л., Гидрометеоиздат, 1969. 150 с.
80. Милихикер Ш. Г. Функции распределения водопроницаемости аллювиальных песков. Материалы к научно-технической конференции. Изд. ПНИИИС, 1967, с. 49—53.
81. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. Использование опытно-эксплуатационного водопонижения с целью уточнения гидрогеологических условий месторождения. — «Тр. Всесоюзного института горной геомеханики и маркшейдерского дела». Сб. 64, 1968.
82. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. Обработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 10, с. 34—38.
83. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. О некоторых причинах расхождений фильтрационных параметров, определяемых при разведке месторождений и строительном водопонижении. — «В кн.: Материалы III конференции по обмену опытом в научн. исслед. и проектир. осушен. месторождений полезных ископаемых». Белгород, 1969, с. 49—55.
84. Мироненко В. А., Сердюков Л. И. Применение метода интегральных соотношений при анализе результатов опытных откачек в слоистых толщах. — «Изв. ВУЗов». Геология и разведка, 1969, № 11, с. 86—93.
85. Монастырский Л. А. Определение расчетного коэффициента фильтрации при подсчете эксплуатационных запасов вод береговых водозаборов. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 5, с. 35—39.
86. Моркос Н. З., Шестаков В. М. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойного пласта по данным опытных откачек. — «Разведка и охрана недр», 1966, № 4, с. 48—52.
87. Моркос Н. З., Манукьян Д. А. Методика определения гидрогеологических параметров двухслойной среды по данным опытных работ. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 10, с. 38—42.
88. Муфтаров А. Ж., Ковалев В. Ф., Сырман. Опыт определения гидрогеологических параметров полосообразного в плане водоносного пласта. — «Тр. института геологии Уральского филиала АН СССР», вып. 76, 1965.
89. Назаров С. П. Методы определения проницаемости нефтяных коллекторов. — «Нефтяное хозяйство», 1955, № 1, с. 37—44.
90. Пашковский И. С. Вероятностная оценка гипотезы об однородности водоносного горизонта по проницаемости. — «Вестник МГУ», 1966, № 5, с. 87—98.
91. Пашковский И. С. Особенности определения гидрогеологических параметров в напорных горизонтах. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 10, 1968, с. 88—94.
92. Пашковский И. С. Определение гидрогеологических параметров в условиях взаимодействия водоносных горизонтов. — «Вестн. МГУ». Геология, № 2, 1969, с. 57—64.
93. Пашковский И. С. Откачки в слоистых системах. — «В кн. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ», 1969, с. 95—109.
94. Пашковский И. С., Кухтина В. Д. Особенности определения гидрогеологических параметров в неоднородных водоносных горизонтах. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 58, 1972, с. 105—112.
95. Перцовский В. В. Об оценке точности определения параметров фильтрации. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 4, с. 41—43.
96. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения. Под ред. Биндемана Н. Н., М., «Недра», 1969, 328 с.
97. Полубаринова — Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехтеориздат, 1952, 676 с.
98. Плотников Н. И., Язвин Л. С., Карулина В. Ф. Об основных методических ошибках при проведении гидрогеологических исследований для целей водоснабжения. — «Разведка и охрана недр», 1967, № 1, с. 45—53.

99. Пыхачев Г. Б. О дебите скважин в неоднородном пласте. — «Тр. ГНИ и ГрозНИИ», вып. 1, 1944.

100. Рац М. В. Неоднородность горных пород и масштабные эффекты. Материалы к научно-технической конференции. Изд. ПНИИИС, 1967, с. 73—77.

101. Рац М. В. Неоднородность горных пород и их физических свойств. М., «Наука», 1967, 108 с.

102. Рац М. В., Чернышев С. Н., Язвин Л. С. О фильтрационной неоднородности горных пород. Изд. ЦАНИСА, № 1(4), серия II, 1970, с. 15—32.

103. Родионов Д. А. Функции распределения содержания элементов и минералов в изверженных горных породах. М., «Наука», 1964, 102 с.

104. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. М., «Недра», 1966, 283 с.

105. Самсонов Б. Г. Вариационно-статистический метод оценки водообильности горных пород на примере основных водоносных комплексов Северного Казахстана. — В кн.: «Вопросы региональной гидрогеологии...», вып. 3. М., «Недра», 1966, с. 16—24.

106. Самсонов Б. Г., Бурдакова О. Л., Кривошеева Л. И. Рекомендации по обработке результатов опытных работ на основе уравнений неустановившегося движения. Изд. Второго гидрогеологического управления. М., 1969, 104 с.

107. Самсонов Б. Г. Об определении расчетных гидрогеологических параметров на основе совокупности частных значений. — «Разведка и охрана недр», 1969, № 2, с. 48—53.

108. Самсонов Б. Г., Бурдакова О. Л., Кривошеева Л. И. Сравнительная оценка способов определения расчетных гидрогеологических параметров. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 9, с. 40—43.

109. Сердюков Л. И. К методике обработки результатов опытных откачек, проводимых в условиях взаимосвязи водоносных горизонтов. — «Тр. ВНИМИ», сб. 64. Л., 1968.

110. Скабалланович И. А. Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1960, 388 с.

111. Скабалланович И. А. Методика опытных откачек. М., Госгеолтехиздат, 1962, 111 с.

112. Скабалланович И. А. О продолжительности откачек при опробовании водоносных горизонтов. — «Разведка и охрана недр», 1968, № 1, с. 52—54.

113. Смехов Е. М. Закономерности развития трещиноватости горных пород и трещинные коллекторы. — «Тр. ВНИГРИ», вып. 172, 1962. 146 с.

114. Смехов Е. М. Некоторые новые данные о состоянии изученности трещинных коллекторов нефти и газа. — «Тр. ВНИГРИ», вып. 242, 1965, с. 26—38.

115. Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М., Госгеолтехиздат, 1962, 322 с.

116. Стрельцова Т. Д., Шестаков В. М. Определение гидрогеологических параметров безнапорных пластов по данным опытных откачек из совершенных скважин. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 1, 1967, с. 4—24.

117. Сунцов М. А. К вопросу прогноза водопритоков в горные выработки на примере карстового района Северного Урала. — «Тр. ЛГП им. Ф. Н. Саваренского АН СССР», № 16, 1959.

118. Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ (Методические рекомендации). Изд. ВСЕГИНГЕО, 1969, 185 с.

119. Толстов Я. Б. Некоторые приемы определения обобщенных гидрогеологических параметров напорного пласта. — «Разведка и охрана недр», 1970, № 12, с. 42—48.

120. Требин Ф. А., Щербаков Г. В., Яковлев В. П. Гидромеханические методы исследования скважин и пластов. М., «Недра», 1965. 276 с.

121. Р. де Уист. Гидрогеология с основами гидрологии суши. Том I, М., «Мир», 1969, 311 с.
122. Р. де Уист, Дэвис С. Гидрогеология. Том II. М., «Мир», 1970, 256 с.
123. Фадеева М. В. Опыт определения коэффициента фильтрации по данным многолетней эксплуатации водозаборов. — «Докл. АН БССР», 1965, № 4.
124. Фаренгольц З. Д., Коляда М. Н. Опыт применения методов математической статистики для изучения законов распределения гидрогеологических параметров. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 17, 1969, с. 76—112.
125. Хантуш М. С. Анализ опытных откачек из скважин в водоносных горизонтах с перетеканием. — В кн.: Вопросы гидрогеологических расчетов, М., «Мир», 1964, с. 24—38.
126. Хантуш М. С. Движение подземных вод в пластах переменной мощности. — В кн. Вопросы гидрогеологических расчетов. М., Мир, 1964, с. 39—45.
127. Хантуш М. С. Неустановившийся приток подземных вод к скважине, несовершенной по степени вскрытия. — В кн.: Вопросы гидрогеологических расчетов. М., «Мир», 1964, с. 68—73.
128. Хантуш М. С. Новое в теории перетекания. В кн.: Вопросы гидрогеологических расчетов. М., «Мир», 1964, с. 15—23.
129. Хантуш М. С. Скважины вблизи рек со слабопроницаемым ложем. Переводы статей по гидрогеологии и инженерной геологии, вып. 8 (Динамика подземных вод) . Изд. ВСЕГИНГЕО, 1969, с. 43—62.
130. Швидлер М. И. Фильтрационные течения в неоднородных средах. М., Гостоптехиздат, 1963, 136 с.
131. Шестаков В. М. Некоторые вопросы теории упругого режима фильтрации. — «ПМТФ», 1962, № 3, с. 67—71.
132. Шестаков В. М. Об определении гидрогеологических параметров пласта по данным опытных откачек в условиях неустановившейся фильтрации.— «Разведка и охрана недр», 1962, № 12, с. 37—42.
133. Шестаков В. М. Неустановившаяся фильтрация в двухслойной среде. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1963, № 6.
134. Шестаков В. М. Определение гидрогеологических параметров по данным откачек в условиях неустановившейся фильтрации с помощью эталонных кривых. «Бюлл. НТИ Госгеолкома СССР», 1964, № 3.
135. Шестаков В. М. Оценка сопротивления ложа водоемов при гидрогеологических расчетах. — «Разведка и охрана недр», 1964, № 5, с. 34—38.
136. Шестаков В. М. Теоретические основы оценки подпора, водопонижения и дренажа. Изд-во МГУ, 1965, 233 с.
137. Шестаков В. М., Пашковский И. С. Анализ режима восстановления уровня воды в скважине. «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 1, 1967, с. 28—35.
138. Шестаков В. М., Стрельцова Т. Д. Методика обработки опытных откачек из совершенных скважин в грунтовых потоках. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 1, 1967.
139. Шестаков В. М., Зеегофер Ю. О. К методике фильтрационных расчетов несовершенных скважин. «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 17, 1969, с. 35—46.
140. Шестаков В. М. Формирование фильтрационного потока при откачке из совершенной скважины вблизи экранированного водоема. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 17, 1969, с. 47—54.
141. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М., «Мир», 1970, 368 с.
142. Щелкачев В. Н., Назаров С. Н. Учет влияния гидродинамического несовершенства скважин в условиях упругого режима. «Нефтяное хозяйство», 1954, № 5.
143. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959, 467 с.
144. Щелкачев В. Н. Графики понижения — восстановления дав-

ления и скин-эффект в простейших условиях неоднородного пласта. — В кн.: Подземная гидродинамика. Гостоптехиздат, 1961, с. 86—95.

145. Щелкачев В. Н. Уточнение приближенной формулы для определения понижения давления иа стеике укрушненной скважины, пущенной с постоянным дебитом. — В ки.: Подземная гидродинамика. Гостоптехиздат, 1961.

146. Язвин Л. С., Боревский Б. В. Опыт определеиия расчетных параметров по данным групповых откачек. «Разведка и охрана недр», 1963, № 4, с. 42—47.

147. Язвин Л. С. О количестве понижений уровня при проведении опытных откачек. «Разведка и охрана недр», 1965, № 5, с. 42—45.

148. Язвин Л. С., Гольдберг В. М. К вопросу расчета коэффициента фильтрации по данным откачки из несовершенных скважин. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 1, 1967, с. 43—46.

149. Язвии Л. С., Карулина В. Ф., Фаренгольц З. Д. К вопросу определения расчетных гидрогеологических параметров. — «Тр. ВСЕГИНГЕО», вып. 17, 1969, с. 113—136.

150. Язвин Л. С. Достоверность гидрогеологических прогиозов при оценке эксплуатационных запасов подземных вод. Изд. ВСЕГИНГЕО, 1971, 168 с.

151. Aitchison J., Brown J. A. C. The lognormal distribution. Cambridge Univ. Press., 1957.

152. Brand E. W. Comparative analysis of data from pumping tests in an unconfined aguifer. Proc. Inst. Civil. Engrs., 1967, 267—284.

153. Boulton N. S. The drawdown of the water table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation. Proc. Inst. Engrs., 1954.

154. Boulton N. S. Analysis of data from non equilibrium pumping tests allowing for delaed yild from storage. Proc. Inst. Civil. Engrs., 1963, 469—482.

155. Bokhari S. M. H., Strachan I. K., Turner A. K. Drawdowns due to pumping from strip aquifers. J. Irrigat. and Drain. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Engrs., 1968, 94, N 2, 233—242.

156. Berkaloff E. Essai de puits interpretation nappe libre avec strate conductrice d'eau privilegiéé. Paris, 1963. DS 63 A 18.

157. Besbes M. L'effet barometmétrique dans les puits en relation avec le'coefficient de'magasinement et l'etancheite du toit des nappes captivec. Bull. Bur. geol. et minires. 1969, Sec. 3, N 2, 57—76.

158. Cooper H. H., Jacob C. E. A generalized grafical metod for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. Amer. Geophisic. Union, v. 27 IV, 1946.

159. Degallier R. Interpretation des variations naturellrs du niveau des nappes. Bull. rech. geol. et minireg, 1969, Sec. 3, N 2.

160. Discussion on the paper: «Comparative analysis of data from pumping tests in an unconfined aquifer.» by Brand E. W. Proc. Inst. Civil. Engrs., 1968, 40, 383—392.

161. Hantush M. Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer. J. of Geophis. Research v. 72, N 26, 1967, 1709—1720.

162. Hantush M. Flow of ground water in relatively thick leaky aquifers. Water Resources Res., 1967, 3, N 2, 583—590.

163. Hantush M., Jacob C. E. Nonsteady radial frow in an infinite leaky aquifers and nonsteady green's funcions for aninfinite strip of leaky aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union, 36, 1955.

164. Horner D. R. Pressure build-up in wells. Third World Petroleum Congress, the Hague, 1951, Proc. sect. II.

165. Ferris I. G., Knoroles D. B., Brown B. H., Stallman R. Theory of aquifer tests. Geol. Survey Water Supply. Paper 1536-E, 1962, 69—171.

166. Kruseman G. P., de Ridder N. A. Analysis and evaluation of pumping test data. Bull. Int. Inst. Land Reclam. and Improvment. 1970, N 11, 1—200.

167. Lohr A. Beitrag zur Interpretation des Pumpversuches als instationärer Vorgang. Das Gas und Wasserfach, Heft 26/1967 München.
168. Ohling Iochen Zur Auswertung von Pumpversuchen bei scheinbarem Beharrungzustand. Wasserwirtschaft, 1968, 58, N 10, 291—294.
169. Mansur C., Dietrich R. J. Pumping test to determine permeability ratio. Proc. Amer. Soc. Civil. Engrs. 1965, 91, N 4, 151—183.
170. Park J. Permeability and radius of a skin. The oil and gas journ., 18, 1962.
171. Pirson S. I. Performanse of fractured oil reservoirs. Bull. Amer. Ass. of Petrol. Geologist, February, v. 37, 1953.
172. Rognon P. Interpretation d'un essai de pumpage dans un puits situe á proximité d'une rivirére. «Eau», 1965, 52, N 9, 434—438.
173. Sakai G. Methods for determining specific yield of aquifer. J. Japan. Assoc. Grundwater Hydrol..., 1967, N 13, 1—6.
174. Schmidt F. Grundwasserströmung bei Gruppen von vollkommenen Brunnen. Acta mech. 1966, 2, N 1.
175. Singhal B. B., Gupta B. L. Analysis of pumping test data froma well in the Ihdo-Gangetic alluvium of India and its bearing an the aquifer characteristics. J. Hydrol., 1966, 4, N 2, 121—140.
176. Stallman R. W. Effekts of water table conditions on water level changes near pumping well. Water Resour. Res. 1965, 1, N 2, 295—312.
177. Sternberg I. M. Simplified solution vor variable rate pumping test. J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Engrs. 1968, 94, N 1, 177—194.
178. Wenzel I. K. Methods for determining permeability of water-bearing materials with special reference to discharging-well methods with a section on direct laboratory method and bibliography on permeability and laminar flow. U. S. Geol. Survey Water Supply, paper 887, 1942.
179. Weeks E. P. Determining the ration of horisontal to vertical permeability by aquifer-test analysis. Water Resours Res., 1965, 5, N 1, 196—214.
180. Wolton W. C. Ground water hydraulics an did to geologic interpretation. Hydraulics engineer U. S. Geol. Survey. The Ohio Journ. of science 55, 1955.
181. Thixem G. Hydrologische Methoden. Leipzig, 1906.
182. Theis C. V. Relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans. Amer. Geophys. Union, 16, 1935, 519—524.
183. Jacob C. E. On the flow of water in elastic artesian aquifer. Trans. Amer. Geophys. Union Ground Water Note 8, 1940.
184. Jacob C. E. Coefficients of storage and transmissibility obteined from pumping tests in the Houston district, Texas. National Research Council. Trans. Amer. Geophys. Union of 1941, p. 111.
185. Jacob C. E. Flow of ground water. Enginiering Hydraulics. New Yark, 1950.

# ОГЛАВЛЕНИЕ


Стр.

Введение . . . . . 3

Глава 1. **Виды и назначение откачек, характеристика режима подземных вод при их проведении в различных гидрогеологических условиях** . . . . . 5

1. Виды откачек и их назначение . . . . . 5
2. Режим движения подземных вод при откачках в различных гидрогеологических условиях . . . . . 7

Глава 2. **Расчетные гидрогеологические параметры и методы их определения по данным откачек** . . . . . 20

1. Краткая характеристика расчетных гидрогеологических параметров 20
2. Общая характеристика методов определения расчетных гидрогеологических параметров . . . . . 23

Глава 3. **Обработка и интерпретация результатов опытных работ в условиях неограниченного однородного напорного водоносного пласта** . . . . . 33

1. Обработка данных опытных работ при постоянном дебите скважин 33
2. Обработка результатов опытных работ при сложном характере возмущения на стадии понижения . . . . . 36
3. Обработка результатов опытных работ при сложном характере возмущения на стадии восстановления уровня . . . . . 50

Глава 4. **Обработка и интерпретация результатов опытных работ в условиях ограниченных в плане однородных напорных пластов для определения параметров без учета влияния границ** 65

1. Критерий применимости метода Джейкоба в ограниченных пластах 67
2. Основные принципы обработки и интерпретации результатов опытных работ в ограниченных водоносных пластах . . . . . 72

Глава 5. **Особенности обработки и интерпретации результатов опытных работ в условиях безнапорных водоносных горизонтов** 97

Глава 6. **Особенности обработки и интерпретации результатов опытных работ в условиях трещинных и трещинно-карстовых водоносных горизонтов** . . . . . 109

1. Некоторые особенности фильтрации жидкости в трещиноватых породах 110
2. Водоносные горизонты в трещиноватых породах с «двойной пористостью» . . . . . 114
3. Водоносные горизонты в породах с резко неравномерной трещиноватостью . . . . . 134
4. Водоносные горизонты в анизотропных трещиноватых породах . . 139

Глава 7. **Особенности обработки и интерпретации результатов опытных работ в условиях слоистых водоносных горизонтов** 145

1. Раздельное опробование водоносных прослоев . . . . . 147
2. Суммарное опробование слоистых толщ . . . . . 167
3. Особенности обработки опытной информации на стадии восстановления уровня . . . . . 177

Глава 8. **Обработка и интерпретация результатов опытных работ с учетом влияния действующих границ** . . . . . 180

1. Участки, ограниченные непроницаемыми границами . . . . . 181
2. Участки с границами фильтрационной неоднородности . . . . . 193

Стр.

3. Участки вблизи локализованных очагов разгрузки подземных вод . . 197
4. Участки в пластах со сложной конфигурацией разнородных границ 211

Глава 9. Особенности методики обработки и интерпретации результатов опытных работ на прибрежных участках . . . . . 216

Глава 10. Определение и квалификация основных расчетных параметров в условиях хаотической неоднородности фильтрационных свойств пласта . . . . . 225

1. Характеристика хаотической неоднородности с помощью статистических оценок . . . . . 226
2. Классификация водовмещающих пород по степени хаотической неоднородности и связь эффективных гидрогеологических параметров со статистическими оценками . . . . . 229
3. Характер деформации опытных закономерностей изменения уровня в хаотически неоднородных пластах . . . . . 235
4. Особенности определения параметров в хаотически неоднородных пластах . . . . . 240
5. Квалификация параметров хаотически неоднородного пласта . . . 248

Глава 11. Учет естественных колебаний уровня подземных вод при обработке результатов опытных откачек . . . . . 251

1. Колебания уровня под влиянием изменения барометрического давления . . . . . 252
2. Колебания уровня под влиянием изменения интенсивности питания водоносного горизонта атмосферными осадками . . . . . 255
3. Колебания под влиянием подъемов и спадов уровней в поверхностных водотоках и водоемах . . . . . 261

Глава 12. Основные вопросы методики проведения опытных работ и рекомендации по их постановке . . . . . 264

1. Основные вопросы методики проведения откачек . . . . . 264
2. Рекомендации по постановке опытных работ . . . . . 266

Список литературы . . . . . 294

Борис Владимирович Боревский
Борис Григорьевич Самсонов
Леонид Семенович Язвин

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПО ДАННЫМ ОТКАЧЕК

Редактор издательства *Л. Н. Федорова.* Технический редактор *З. А. Болдырева*
Корректор *И. Н. Таранева*

Сдано в набор 6/II 1973 г. Подписано в печать 25/IV 1973 г. Т-07157. Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага № 2. Печ. л. 19. Уч.-изд. л. 20,58. Тираж 5000 экз. Заказ № 77/4252—2. Цена 2 р. 22 к.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
Ленинградская типография № 6 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, г. Ленинград, Московский пр., 91.