

УДК 556.3.06

О ВЛИЯНИИ МАСШТАБА ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ НА РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ (НА ПРИМЕРЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ АЛМАЗОВ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА)

© 2017 г. А. А. Дунюшин*, Л. Н. Синдаловский**,
А. М. Никуленков**, В. Г. Румынин***

*Институт наук о Земле СПбГУ.

Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия.

E-mail: dunay-23@hotmail.com

** Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии

им. Е.М. Сергеева РАН, Средний пр., д.41, оф. 519, Санкт-Петербург, 199004 Россия.

E-mail: office@hgepro.ru

Поступила в редакцию 20.01.2017 г.

Проведен анализ материалов опытно-фильтрационных работ (одиночные, кустовые откачки и режимные наблюдения за уровнями подземных вод), полученных на различных стадиях разведки и обработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Интерпретация полевых замеров и расчет фильтрационных параметров осуществлялись на программном комплексе ANSDIMAT. Опытные опробования отличались друг от друга как в техническом плане, так и длительностью гидродинамического воздействия на водоносную толщу. Получены фильтрационные параметры, значения которых оказались чувствительными к типу опытного опробования, что, вероятно, является следствием проявления масштабного эффекта.

Интерпретация одиночных откачек показала явно заниженные значения проводимости (160–190 м²/сут), а групповых откачек и режимных наблюдений при большей длительности – относительно схожие результаты (270–350 м²/сут). Установлено, что длительное водопонижение в процессе эксплуатации карьера способствует формированию водопритока к карьере не только за счет сработки упругих запасов основного (падунского) водоносного комплекса, но и за счет привлечения гравитационных запасов воды из смежного горизонта.

Показано, что одиночные откачки, ввиду небольшого масштаба и короткого времени опробования, достаточно чувствительны к сопротивлению прифильтровых зон опытных скважин и могут давать сильно смещенные значения проводимости основного пласта. Кустовые откачки позволяют исключить технические и конструктивные недостатки скважин при интерпретации опытных опробований и достоверно оценить проводимость водоносного горизонта, но не могут в полной мере учесть “включение” дополнительных источников питания. Использование в прогнозных расчетах заниженных значений водоотдачи, полученных в результате относительно кратковременных опытных опробований, может приводить к неоправданно завышенному радиусу влияния дренажных систем карьера на водоносный горизонт.

Ключевые слова: *опытно-фильтрационные работы, масштабные эффекты, месторождение алмазов им. М.В. Ломоносова, дренаж карьера, мониторинг подземных вод, программа ANSDIMAT.*

ВВЕДЕНИЕ

Каждый проект разработки месторождения полезных ископаемых требует серьезных гидрогеологических изысканий, направленных на оценку возможных водопритоков в горные выработки и, при необходимости, гидродинамический расчет дренажных систем.

Как правило, на стадии разведки месторождения в полевых условиях проводятся опытно-фильтрационные работы (одиночные и кустовые откачки), полученные параметры задаются в численную модель, на которой далее имитируется горная выработка и осуществляется расчет водопритоков в нее.

Однако часто можно обнаружить, что при реальной обработке месторождения, предсказанные

объемы водопритоков и радиус гидродинамического влияния не совпадают с их прогнозными значениями.

Отчасти эту ситуацию можно объяснить тем, что полученные в результате проведения опытно-фильтрационных работ параметры напрямую переносятся в численную модель без учета масштабных эффектов. Очевидно, что масштаб гидродинамического возмущения от кустовой или одиночной откачки не сопоставим с масштабом воздействия непосредственно самой горной выработки на водоносный пласт (рис. 1), что необходимо учитывать при расчетах водопритоков.

В работе предпринята попытка проанализировать материалы опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений за уровнями подземных вод, полученных на различных стадиях разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Результаты интерпретации опытных опробований, проведенные на локальных участках месторождения на стадии разведки и проектирования, сравниваются с фильтрационными параметрами, установленными по данным многолетних режимных наблюдений уже непосредственно на этапе отработки месторождения.

Месторождение алмазов в Архангельской области, названное впоследствии в честь М.В. Ломоносова, было открыто в 1980 г. В настоящее время оно включает несколько участков – кимберлитовых трубок: Архангельская, им. Карпинского-1, им. Карпинского-2, им. Ломоносова, Поморская и Пионерская (рис. 2), а общие запасы трубок составляют порядка 194 млн каратов [10]. В 1994–1997 гг. на месторождении (трубки Архангельская, им. Карпинского-1 и им. Ломоносова) проводились опытно-промышленные работы по добыче алмазов. Одновременно на трубке Архангельская были начаты вскрышные работы в рамках проекта на строительство опытно-промышленного карьера, а в 2005 г. был построен обогатительный комбинат, и начата промышленная добыча [10]. На 1.01.2014 г. добыча руды на трубке велась уже на горизонте +0 м (глубина карьера составляла 110 м), а мощность обогатительной фабрики составляла ~ 1 млн т руды в год.

Геологический разрез района представлен обводненными породами четвертичного, каменноугольного и вендского возрастов (см. рис. 2). Гидрогеологическая стратификация описываемой площади основывается на литолого-стратиграфическом принципе [9, 2, 1]. Так, на всем участке работ, первым от земли залегает водоносный комплекс четвертичных отложений (Q),

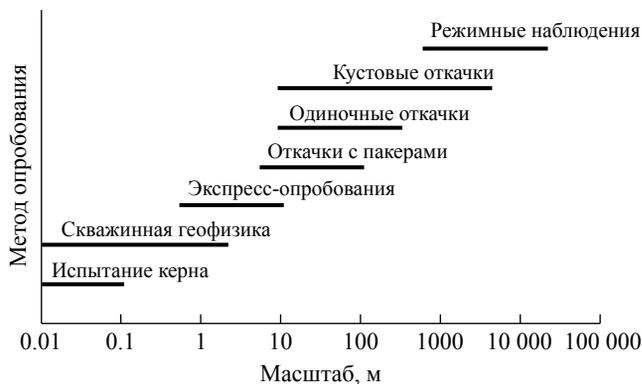


Рис. 1. Масштабы измерений фильтрационных свойств при различных видах опробований [12].

представленный как песчаными осадками (аллювиальные, озерно-аллювиальные, морские и т.д.), так и водоупорными глинистыми разностями (московская морена, микулинские глины и т.д.), общая мощность которых достигает 50 м. Ниже по разрезу локально развит водоносный комплекс средне- и верхнекаменноугольных карбонатных отложений (C_{2ol-ok}) с обводненной мощностью до 20 м. Комплекс представлен терригенно-карбонатными породами, выветрелыми в верхней части. Его подстилает среднекаменноугольный водоносный комплекс урзугской и воереченской свит (C_{2ur}), развитый практически повсеместно. Он сложен в основном мелко- и среднезернистыми кварцевыми песчаниками с глинистым цементом, а его мощность изменяется от 3 до 40–50 м с юго-запада на северо-восток. Локально распространены кимберлитовые брекчии возраста D_3-C_2 , являющиеся, по сути, водоупорами и прорывающие все породы до возраста C_{2ol-ok} . Падунский водоносный комплекс (V_{2pd}) распространен повсеместно и подстилает отложения урзугской и воереченской свит. Он сложен мелкозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, а общая мощность комплекса составляет более 220 м. Его подстилает комплекс отложений мезенской (V_{2mz}) и усть-пинейской (V_{2up}) свит, общая мощность которого составляет более 700 м. Эти отложения представлены переслаиванием алевролитов, аргиллитов и редких маломощных прослоев песчаников и являются, по сути, водоупором. За нижнюю границу водоносного разреза принята кровля слабопроницаемых терригенных отложений мельских слоев мезенской свиты венда, имеющих региональное распространение.

Основной водоприток в карьер поступает с подземными водами через падунский водоносный горизонт (V_{2zl}) [8]. Доля же атмосферных осадков

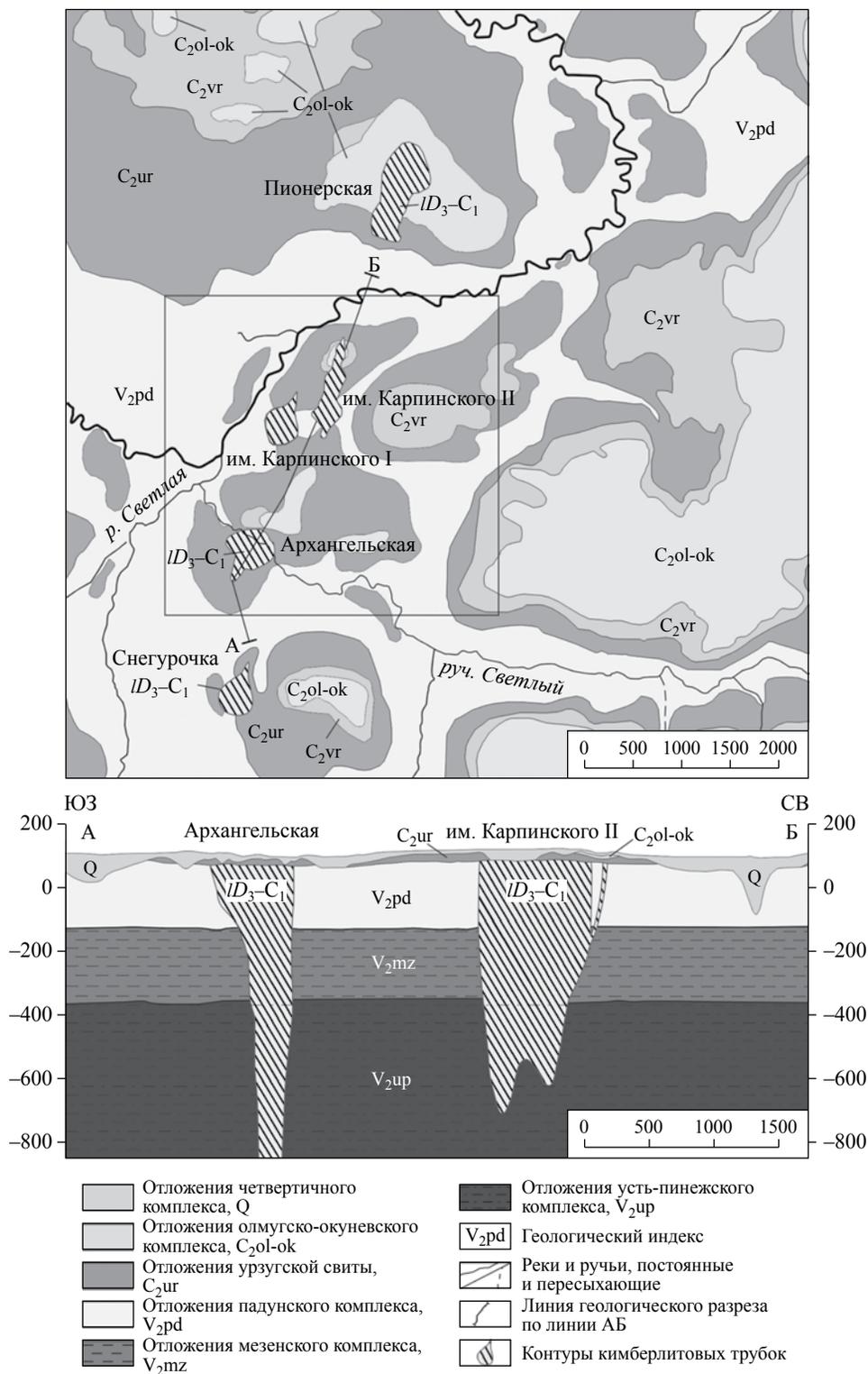


Рис. 2. Схематическая геологическая карта и разрез месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова.

в карьерном водопритоке в среднем не превышает 7%). Водонасные горизонты, смежные с падунским: урзугский (C_{2ur}), мезенский (V_{2mz}), а также в некоторых местах четвертичный (Q), в меньшей степени влияют на приток воды в карьер.

В связи со сложными гидрогеологическими, инженерно-геологическими и горнотехническими условиями (высокая степень обводненности массива, низкая прочность и несущая способность вскрышных пород и руд, значительный

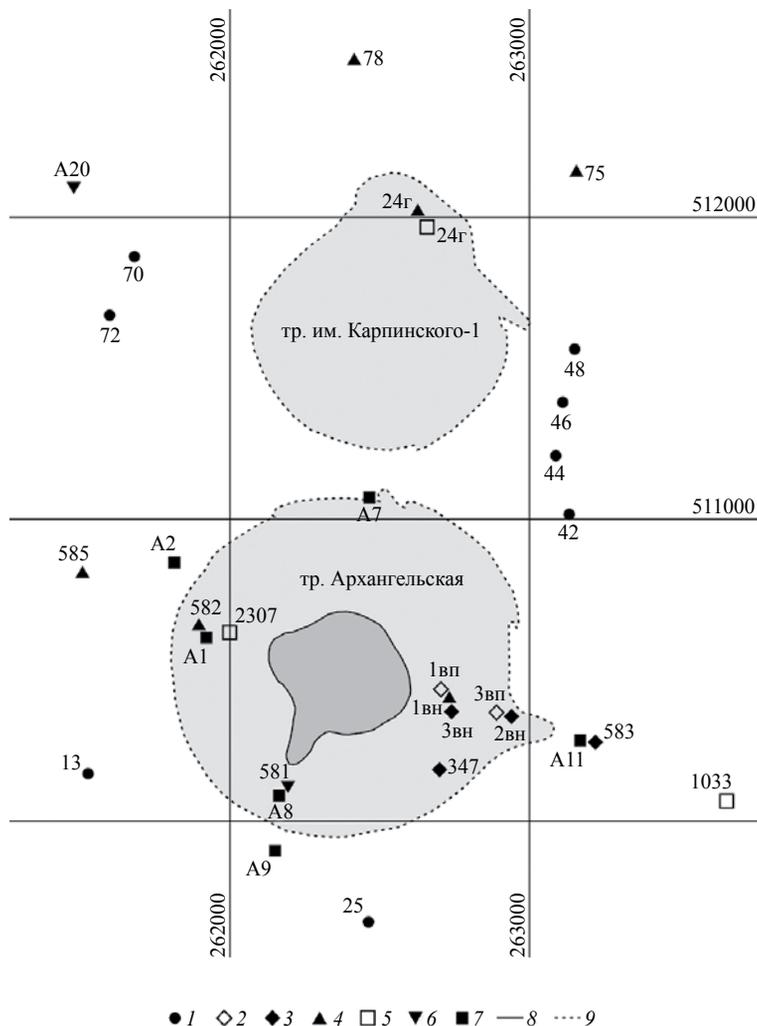


Рис. 3. Схематическая карта фактического материала: 1 – водопонижающие скважины, в которых проводились опытные откачки; 2, 3 – откачивающие скважины и пьезометры на падуновский водоносный горизонт при групповой откачке; 4 – пьезометры на падуновский водоносный горизонт, использованные впоследствии в режимных наблюдениях; наблюдательные скважины режимной сети на: 5 – падуновский, 6 – мезенский, 7 – урзугский, водоносные горизонты; контур карьера на: 8 – 2008 г., 9 – 2013 г.

объем рыхлых отложений в перекрывающих отложениях), на карьере необходимо обязательное предварительное осушение зоны ведения горных работ.

Система осушения месторождения представлена дренажными устройствами внешнего контура. На схеме (рис. 3) показаны места расположения опытных и наблюдательных скважин, используемых в различные периоды освоения месторождения для изучения гидрогеологических параметров посредством опытно-фильтрационных работ (ОФР), включающих опытные откачки и интерпретацию наблюдений за режимом подземных вод, а также для детализации гидрогеологических условий месторождения с целью

оптимизации дренажных мероприятий. Ниже дается краткая характеристика ОФР.

На этапе разведки месторождения в 1992 г. была организована групповая откачка, методическое сопровождение и интерпретация которой осуществлялась сотрудниками ВНИМИ и Санкт-Петербургского горного института. Откачка производилась ОАО «Севералмаз» из 2-х центральных скважин, а наблюдение за уровнями происходило по 30 наблюдательным скважинам. Позже, в 2012–2013 гг. для уточнения фильтрационных параметров падуновского водоносного комплекса при введении в эксплуатацию новых скважин водопонижительного контура проводились одиночные откачки. С 2005 г. на месторождении ведутся режимные наблюдения за

эксплуатационным понижением уровня подземных вод при работе дренажной системы карьера и контура водопонижающих скважин (ВПС). Соответствующая режимная сеть включает 36 наблюдательных скважин (на рис. 3 показана лишь часть из этих скважин, данные по которым отражают наиболее продолжительные ряды наблюдений, использованные в последующих фильтрационных расчетах).

Выполненный комплекс гидрогеологических работ представляет интерес с позиций сопоставления гидрогеологических параметров, полученных в ходе различных по длительности и масштабу опробований пород (одиночные и групповые откачки), а также в процессе режимных наблюдений). Кроме того, в противовес широко внедряемым в настоящее время численным решениям геофильтрационных задач на сетках, авторам хотелось продемонстрировать возможности аналитических методов интерпретации данных опытных опробований и опытно-эксплуатационного водопонижения на реальном объекте. Для этого использовался программный комплекс ANSDIMAT [4]. Наконец, изучаемая толща водоносных пород также характерна для другого месторождения данной алмазодной провинции – им. В. Гриба, так что рассматриваемый здесь опыт гидрогеологических работ может быть востребован в будущем [6].

Следуя последовательности, отвечающей постепенному наращиванию масштаба опытного воздействия, сначала рассмотрим результаты кратковременных одиночных откачек (длительностью до пяти суток), затем продолжительных групповых откачек (в течение десятков суток), и в конце – данные многолетних режимных наблюдений.

ОДИНОЧНЫЕ ОТКАЧКИ

Одиночные откачки проводились для уточнения фильтрационных параметров падунского водоносного комплекса при введении в эксплуатацию новых скважин водопонижительного контура (см. рис. 3), а для обработки были выбраны 8 наиболее представительных откачек. Поскольку их продолжительность невелика, то и масштаб опробования относительно мал (радиус влияния по нашим оценкам не превы-

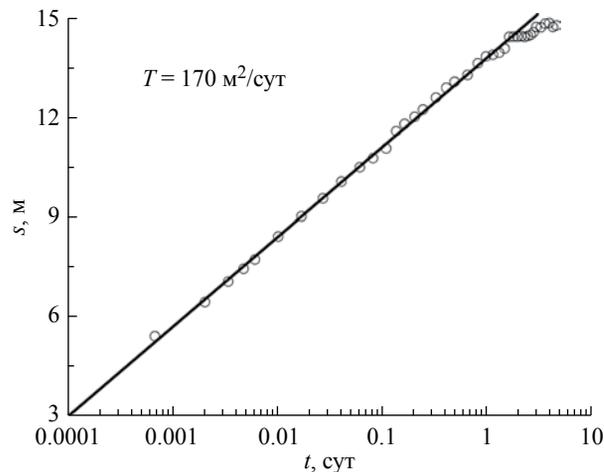


Рис. 4. Обработка графика одиночной откачки по ВПС 42.

шает 300 м), так что перетекание из смежных горизонтов не находит отражения на индикаторных кривых. Поэтому для обработки опытов была принята схема однородного напорного неограниченного пласта без перетекания. Базовое уравнение для интерпретации опытов – решение Джейкоба–Тейса [5, 11]:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left(\frac{r_w^2}{4at} \right),$$

позволяющее в силу логарифмической аппроксимации функции W линеаризовать опытные точки в координатах $s - \lg(t)$; где s – понижение в наблюдательной скважине (м), Q – расход опытной скважины (м³/сут), T – проводимость водоносного пласта (м²/сут), a – пьезопроводность (м²/сут), t – время (сут), r_w – радиус опытной скважины.

На рис. 4 приведен один из наиболее характерных графиков результатов одиночной откачки. На нем видно, что аппроксимирующая кривая, при обработке полученных данных по схеме напорного неограниченного пласта, весьма хорошо ложится на фактические данные, однако работа соседних ВПС, находящихся в непосредственной близости, может затруднять обработку.

По результатам обработки наиболее представительных графиков получены значения проводимости для падунского водоносного комплекса (табл. 1).

Таблица 1. Значения проводимости, полученные при одиночных откачках

Скв.	13	25	42	44	46	48	70	72
$T, \text{ м}^2/\text{сут}$	168	159	166	182	183	163	188	153

ГРУППОВАЯ ОТКАЧКА

Длительность групповой откачки составила 27 сут, соответственно масштаб влияния при данном опробовании существенно превосходит масштаб одиночных откачек, достигая по нашим оценкам 2000–3000 м. Режим водоотбора довольно сложный (рис. 5), что обусловлено наличием двух центральных скважин с переменным дебитом, фильтры которых располагались в падунских породах. Наблюдения проводились в 30 пьезометрах, оборудованных как на падунский комплекс, так и на смежные горизонты.

Обработка результатов групповой откачки проводилась с помощью графиков временного прослеживания $s - \lg(t)$ (отдельно для каждой скважины). Предварительная диагностика опытного режима позволила исключить влияние перетекания из смежных горизонтов, и обработка велась в рамках модели неограниченного напорного пласта. Наличие двух эксплуатационных скважин, работающих с переменным дебитом, потребовало использования метода суперпозиции для получения необходимого аналитического решения [5]:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} \left[(Q_i^j - Q_i^{j-1}) W \left(\frac{r_i^2}{4a(t - t_i^j)} \right) \right],$$

где a – пьезопроводность водоносного пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$; N – количество опытных скважин; n_i^j – количество ступеней расхода в i -й опытной скважине на момент времени t_i^j ; Q_i^j – расход j -й ступени i -й опытной скважины ($Q_i^0 = 0$), $\text{м}^3/\text{сут}$;

r_i – расстояние от наблюдательной скважины до i -й опытной скважины, м; s – понижение в наблюдательной скважине, м; T – проводимость водоносного пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$; t – длительность откачки, сут; t_i^j – время начала j -й ступени i -й опытной скважины ($t_i^1 = 0$), сут; $W(u) = \int_u^\infty \frac{\exp(-\tau)}{\tau} d\tau$ – функция влияния скважины. Использование метода суперпозиции предполагает аппроксимацию дебита откачивающих скважин ступенчатыми функциями (см. рис. 5).

Также для обработки применялся способ прямой линии на графиках, построенных в приведенных координатах: графики комбинированного $\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'}{r'^2}$ и площадного $\frac{s}{Q_t} - \lg r'$ прослеживания для группы скважин. Использование прямой линии на таких графиках вытекает из линеаризации базового уравнения фильтрации для групповой откачки с переменным дебитом [5]:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2},$$

$$\ln t' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} \left[(Q_i^j - Q_i^{j-1}) \ln(t - t_i^j) \right],$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^N \left[\ln r_i \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1}) \right],$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i^j} (Q_i^j - Q_i^{j-1}).$$

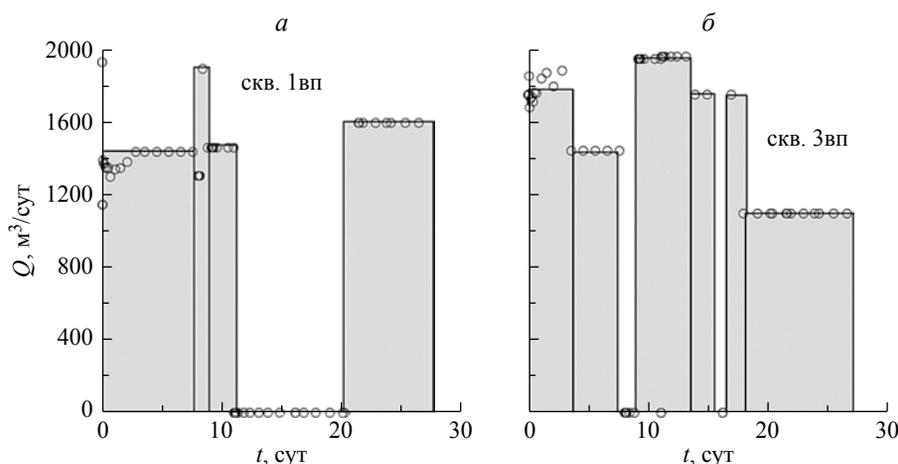


Рис. 5. Изменение расхода эксплуатационных скважин (а – скв. 1вп, б – скв. 3вп) во времени и его аппроксимация ступенчатыми функциями.

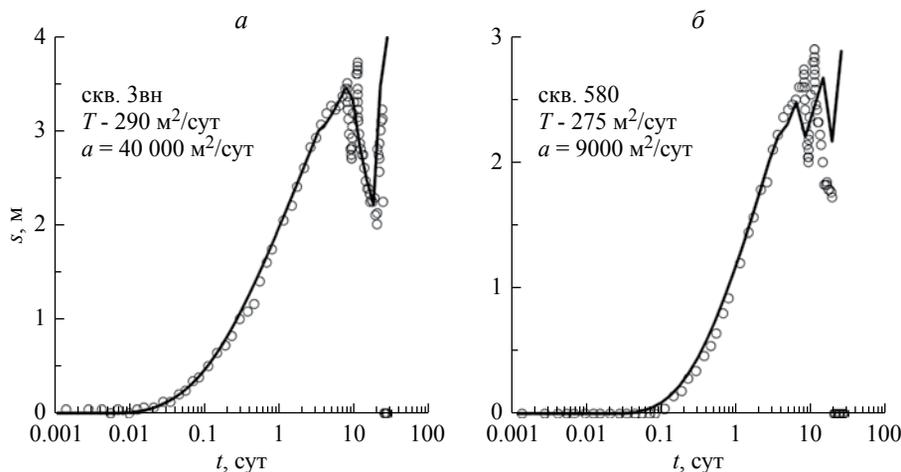


Рис. 6. Подбор аналитических кривых для понижений в наблюдательных скважинах 3вн и 580.

На рис. 6 приведен пример подбора теоретических кривых для двух графиков временно-го прослеживания $s-\lg(t)$ в среде программы ANSDIMAT. Эти графики иллюстрируют высокую степень совпадения опытных и модельных данных, полученных при переменном дебите двух скважин. Результаты подобной интерпретации наблюдений за понижением уровня подземных вод в других скважинах представлены в табл. 2.

Как видно, полученные значения проводимости лежат в довольно узком (за одним исключением – скв. 5вн) диапазоне значений, 270–320 м²/сут; среднее значение T составляет 298 м²/сут, однако расчетная пьезопроводность варьирует в достаточно большом диапазоне значений (примерно

от 10⁴ до 10⁶ м²/сут), что отвечает значениям водоотдачи 3–0.03%.

Для дальнейшей обработки опытных результатов использовались графики комбинированного прослеживания $\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'}{r'^2}$ [11], построенные с привлечением данных о понижении уровня по тем же скважинам (рис. 7).

Видно, что данные, полученные по замерам в различных скважинах, могут быть, в первом приближении, аппроксимированы прямой линией, что говорит о правильности выбора расчетной схемы обработки опробования, исключая перетекание [3]. Рассчитанная таким образом проводимость падунского горизонта

Таблица 2. Результаты обработки на основе графиков временного прослеживания для групповой откачки

№ скв	r , м	T , м ² /сут	a , м ² /сут
2вн ¹⁾	677	275	25000
3вн ¹⁾	475	290	40000
5вн ¹⁾	419	380	250000
583 ¹⁾	964	270	110000
4вн ¹⁾	100\180	280	21000
347 ¹⁾	486	290	70000
570 ²⁾	718	300	240000
2310 ³⁾	175\360	320	80000
580 ³⁾	115\65	275	9000
623 ³⁾	1420\1510	300	900000

¹⁾ – восточный луч, ²⁾ – северный луч, ³⁾ – западный луч; r – расстояние до наблюдательных скважин; 100\180 – расстояния от данной скважины до опытных скважин 1вп и 3вп соответственно; a – пьезопроводность пласта

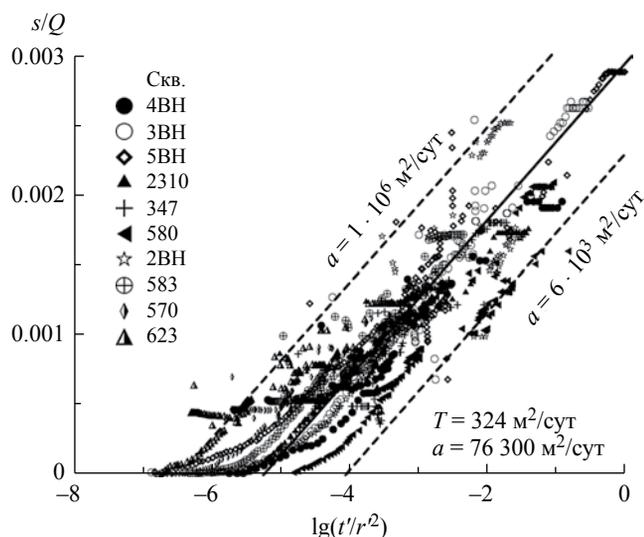


Рис. 7. Обработка кустовой откачки в приведенных координатах.

составила $324 \text{ м}^2/\text{сут}$, средняя пьезопроводность — $7.6 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ (водоотдача около 0.4%), что согласуется с ранее приведенными величинами.

Наконец, авторами проведена интерпретация опыта в приведенных координатах $\frac{s}{Q_t} - \lg r'$ на фиксированный момент времени, отвечающий квазистационарному режиму фильтрации в пласте. Этот момент времени (8.03 сут) ассоциировался с максимальными понижениями в скважинах, зафиксированными перед первой кратковременной остановкой скважинных насосов (рис. 8). Фильтрационные параметры на приведенном графике

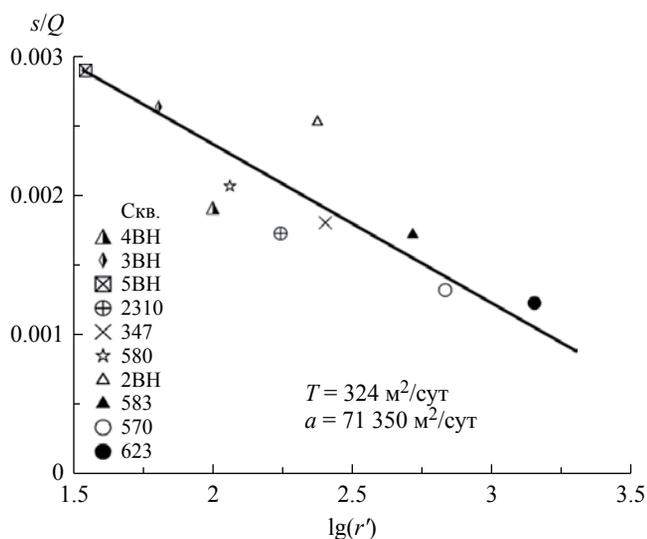


Рис. 8. Обработка кустовой откачки по графику площадного прослеживания в приведенных координатах.

площадного прослеживания рассчитывались по формулам:

$$T = \frac{0.366}{C}, \quad \lg a = 2 \frac{A}{C} - \lg(2.25t'),$$

где C — угловой коэффициент, равный $\text{tg} \alpha = C = (S_2 - S_1)/(lgt_2 - lgt_1)$, A — начальная ордината, определяемая как отрезок, отсекаемый на оси ординат.

Как видно из приведенного графика, опытные точки хорошо аппроксимируются прямой линией. Проводимость, определенная по угловому коэффициенту прямой линии, составила около $330 \text{ м}^2/\text{сут}$, пьезопроводность — $7.1 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$, что также не противоречит ранее приведенным оценкам.

РЕЖИМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Данные, используемые для интерпретации режимных наблюдений, охватывают 6-летний период работы системы дренажа карьера (2005–2010 гг.), снижение уровней отмечалось во всех водоносных горизонтах на расстоянии более 5 км от контура карьера, т.е. масштаб гидродинамического возмущения существенно превосходил масштаб описанных ранее опытных опробований. Для аналитической обработки опытно-фильтрационных наблюдений были выбраны 18 наблюдательных скважин, из которых 14 оборудованы на падунский водоносный комплекс, а 4 — на урзугский и мезенский горизонты (по 2 на каждый).

Условно можно выделить 3 луча наблюдательных скважин, характеризующих динамику радиального фильтрационного потока (см. рис. 3) — восточный (5вн, 1033, 583, 2вн, 3вн, 1вн), северный (570, 78, 75, 24, 23) и западный (2307, 585, 582, А1, А2). Этот поток формируется под влиянием дренажной системы карьера, представленной контуром ВПС, дренирующими падунские отложения, и карьерным водоотливом. Последний перехватывает остаточный приток воды из падунского водоносного комплекса, а также из урзугских и четвертичных отложений.

Как видно из рис. 9, этот водоприток меняется во времени и может быть аппроксимирован ступенчатой функцией. Полученные ряды наблюдений за динамикой изменения уровня в наблюдательных скважинах указывают на гидродинамическое взаимодействие падунского водоносного комплекса с двумя соседними горизонтами посредством перетекания. Это взаимодействие учитывалось в модели трехслойного пласта, для которой существует базовое

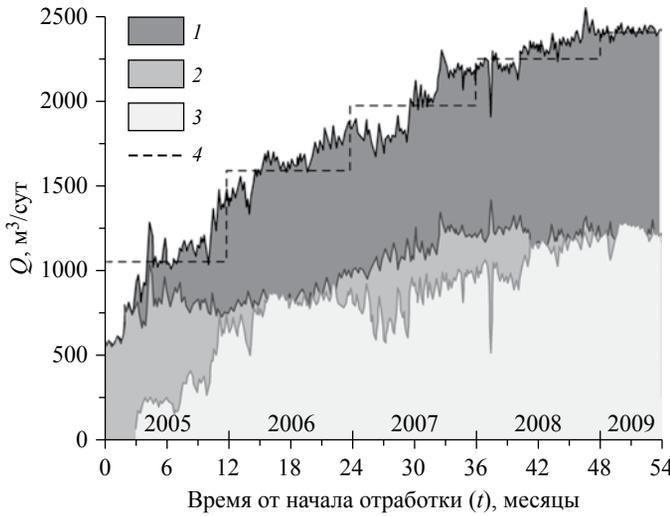


Рис. 9. График водопритоков к дренажным системам карьера: 1 – суммарная производительность водоотлива, 2 – карьерный водоотлив, 3 – водопонижительные скважины, 4 – аппроксимация водопритока ступенчатой функцией по годам.

аналитическое решение [13]. Для падунского комплекса:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, T, S, S', S'', B_1, B_2),$$

и для смежных горизонтов – урзугский и мезенский:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f(r, z', z'', t, T, S, S', S'', B_1, B_2),$$

$$B_1 = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}, \quad B_2 = \sqrt{T \frac{m''}{k''}},$$

где k', k'' – коэффициенты фильтрации смежных пластов, м/сут; S', S'' – водоотдачи смежных пластов, безразмерные; m', m'' – мощности смежных пластов, м; B_1, B_2 – параметры перетекания со стороны кровли и подошвы падунского комплекса, м; z', z'' – вертикальные расстояния от контакта слоев до фильтра наблюдательной скважины, м; r – горизонтальное расстояние от центра карьера до наблюдательной скважины, м (рис. 10).

Для решения представленных зависимостей используется алгоритм программы DP_LAQ (автор программы А.Ф. Моенх (1990 г.)), которая реализована в программном комплексе ANSDIMAT. При этом внешний контур дренажных скважин вместе с карьерным водоотливом рассматривался в качестве единого водозаборного узла – “большого колодца” с эффективным радиусом $r_k = 136$ м [7]. Параметры,

ответственные за поведение гидродинамической системы: проводимость (T) и водоотдача основного пласта (S), емкостные свойства смежных пластов (S' и S'') и параметры перетекания (B_1 и B_2) из выше- и нижележащих горизонтов, включающие проницаемость (k', k'') и мощность (m', m'') смежных слоев.

Использование программного комплекса ANSDIMAT позволило подобрать значения фильтрационных параметров, вполне удовлетворительно описывающих изменение уровней подземных вод в наблюдательных скважинах, вскрывающих как падунский комплекс (рис. 11), так и смежные горизонты – урзугский и мезенский (рис. 12).

Полученные значения параметров (табл. 3) относительно устойчивы (не слишком сильно различаются при использовании различных скважин). Так, расчетные значения проводимости колеблются в довольно узком диапазоне значений – от 300 до 380 м²/сут. Средние величины расчетных параметров представлены в табл. 4. Водоотдача падунского комплекса и мезенского горизонтов имеет довольно низкие значения – сотые и тысячные доли единицы, что характерно для напорных пластов. Водоотдача верхнего слоя, отвечающая водоносным породам урзугской серии, наоборот, довольно высокая: в среднем меняется от 10 до 30%, что свидетельствует о ее гравитационной природе.

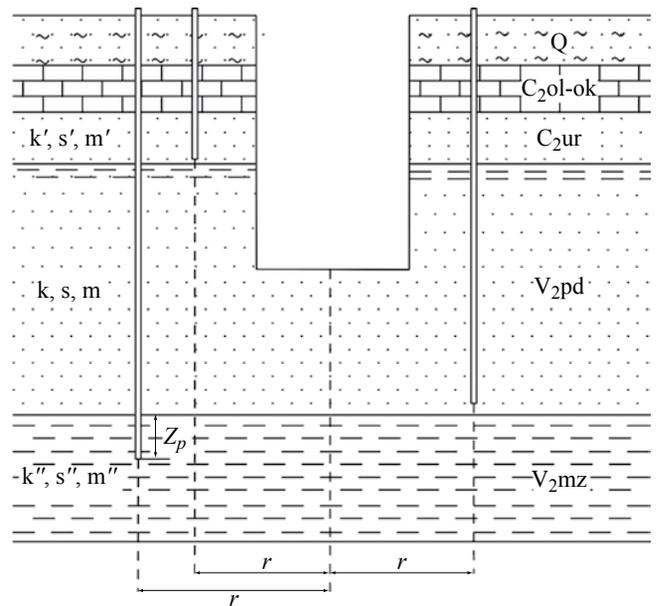


Рис. 10. Схематизация трехслойного гидрогеологического разреза.

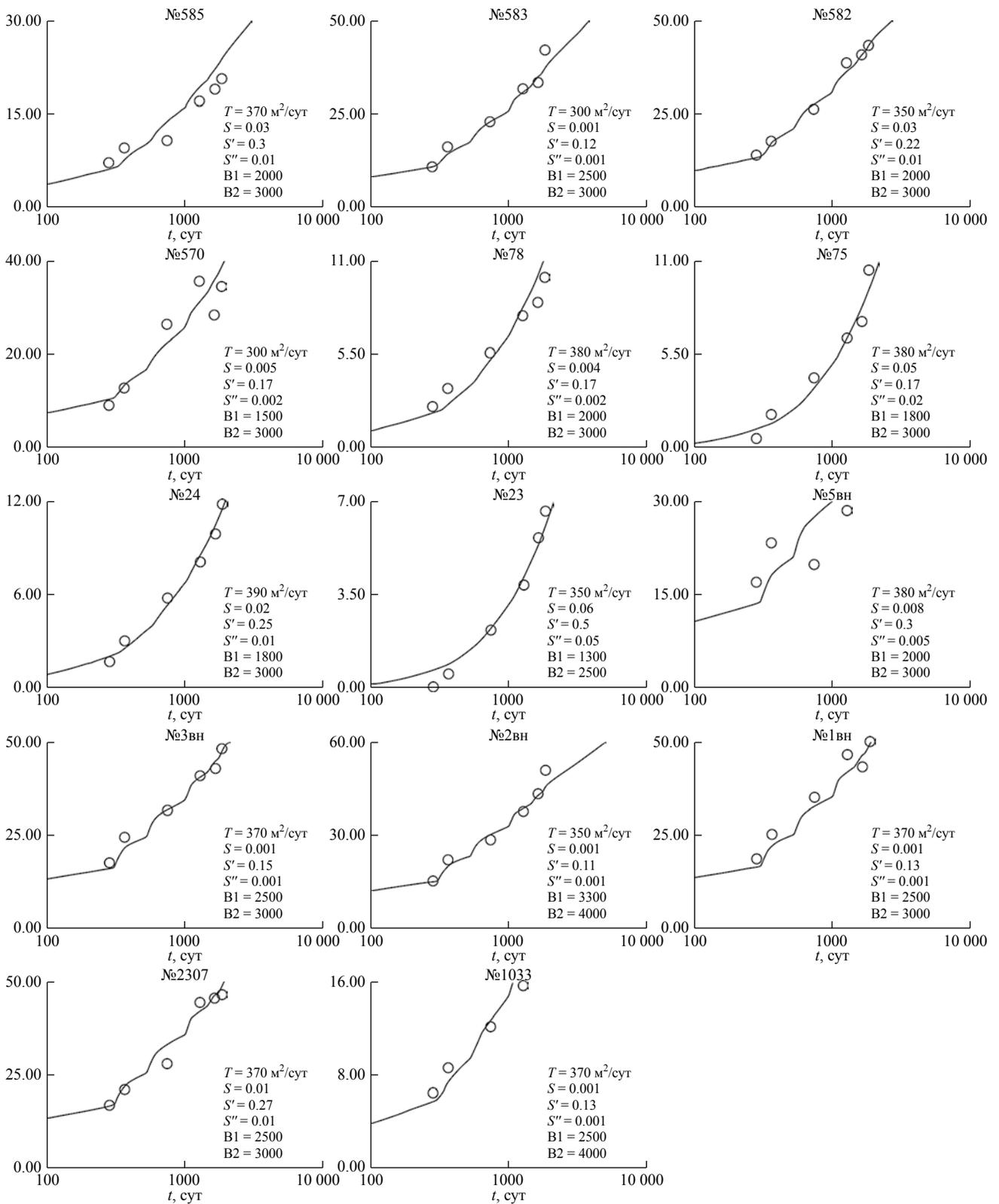


Рис. 11. Интерпретация данных наблюдений за снижением уровня в падунском комплексе. Точки – фактические замеры, кривые – аналитическая модель.

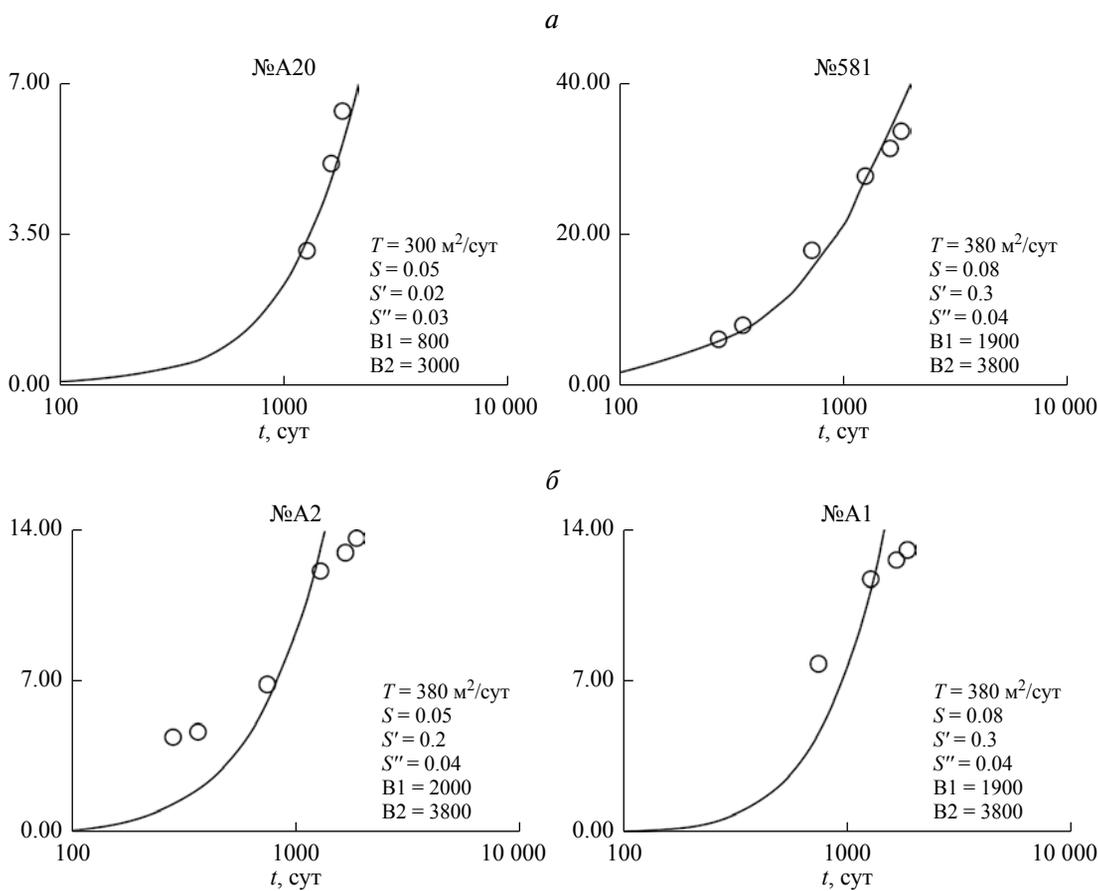


Рис. 12. Интерпретация данных наблюдений за снижением уровня в: а – мезенском, б – урзугском, горизонтах. Точки – фактические замеры, кривые – аналитическая модель.

Параметры перетекания для верхнего и нижнего слоев (мезенский и урзугский горизонты) имеют один порядок значений, укладывающийся в диапазон от 800 до 4000 м.

ВЫВОДЫ

Проведенные гидрогеологические работы отличаются друг от друга, как в техническом плане, так и длительностью гидродинамического воздействия на водоносную толщу. В результате получены фильтрационные параметры, значения которых оказались чувствительными к типу опытного опробования толщи, что, по всей видимости, является следствием проявления масштабного эффекта.

Так, обработка одиночных откачек, достаточно чувствительных к сопротивлению прифильтровых зон опытных скважин, дала явно заниженные (по сравнению с истинными) значения проводимости (160–190 м²/сут), а групповая откачка и режимные наблюдения при большей длительности показали относительно схожие результаты, поэтому диапазон значений 270–330 м²/сут

представляется отвечающим реальным значениям проводимости и подтвержденным анализом данных режимных наблюдений (300–380 м²/сут).

Анализ данных режимных наблюдений показал, что длительное водопонижение в процессе эксплуатации карьера способствует формированию водопритока к дренажной системе карьера не только за счет сработки упругих запасов падунского водоносного комплекса, но и за счет привлечения гравитационных запасов воды в перекрывающем его урзугском горизонте. Результаты интерпретации данных, полученных за более чем 4-летний период наблюдений, в рамках трехслойной модели дали значение водоотдачи этого горизонта в диапазоне от 10 до 30%.

Таким образом, опытные откачки, в том числе и достаточно продолжительные, определяют водоотдачу основного пласта (представленного относительно водопроницаемыми породами), но не могут в полной мере учесть “включение” дополнительных источников питания, формирующихся за счет перетекания воды из смежных водоносных, хотя и менее проницаемых, зон. Поэтому

Таблица 3. Фильтрационные параметры трехслойной системы, подобранные по реакции различных скважин

Параметры	На падунский водоносный комплекс						
	585/877*	583/964	582/452	570/718	78/2138	75/1974	24/1670
T , м ² /сут	370	300	350	300	380	380	390
S	0.03	0.001	0.03	0.005	0.004	0.05	0.02
B_1 , м	2000	2500	2000	1500	2000	1800	1800
B_2 , м	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
S'	0.3	0.12	0.22	0.17	0.17	0.17	0.25
S''	0.01	0.001	0.01	0.002	0.002	0.02	0.01
Параметры	На падунский водоносный комплекс (продолжение)						
	23/1662	5вн/419	3вн/475	2вн/677	1вн/469	2307/357	1033/1430
T , м ² /сут	350	380	370	350	370	370	370
S	0.06	0.008	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001
B_1 , м	1300	2000	2500	3300	2500	2500	2500
B_2 , м	2500	3000	3000	4000	3000	3000	3000
S'	0.5	0.3	0.15	0.11	0.13	0.27	0.13
S''	0.05	0.005	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001
Параметры	На мезенский горизонт		На урзугский горизонт				
	A20/1882	581/293	A2/652	A1/413			
T , м ² /сут	300	380	380	380			
S	0.5	0.08	0.05	0.08			
B_1 , м	800	800	2000	1900			
B_2 , м	3000	3000	3800	3800			
S'	0.32	0.32	0.2	0.3			
S''	0.03	0.03	0.04	0.04			

*В числителе – номер наблюдательной скважины, в знаменателе – расстояние от центра карьера до скважины.

использование в прогнозных расчетах заниженных значений водоотдачи (например, полученных в результате опытных откачек) дает неоправданно завышенный радиус влияния, формирующийся при работе дренажа карьера. Кроме того, стабилизации воронки депрессии способствуют границы обеспеченного питания водоносных

горизонтов, связанные с поверхностными природными и техногенными (например, хвостохранилища) водными объектами. Наличие таких источников, не учтенных в явном виде при интерпретации наблюдений, может обуславливать и проявление обратного эффекта – завышение водоотдачи верхних горизонтов, связанных с такого рода водными объектами.

Таблица 4. Средние значения фильтрационных параметров

Параметры	Горизонты	Значения
T	Падунский	360 м ² /сут
S		0.015
S'	Урзугский	0.25
B_1		1950 м
S''	Мезенский	0.03
B_2		3000 м

Во всяком случае, прогнозы в рамках модели эффективного пласта с проводимостью основного горизонта и гравитационной водоотдачей перекрывающих обводненных зон разреза оказываются более надежными, по сравнению с аналогичными оценками, исходящими из предпосылки напорного пласта с упругой водоотдачей. В рассмотренном примере значения эффективной (суммарной) водоотдачи водоносной толщи, отвечающей, примерно, 20–30%, являются, на

взгляд авторов, наиболее подходящим для прогнозирования понижения уровня подземных вод в зоне влияния дренажа месторождения им. М.В. Ломоносова.

Полученные значения параметров представляют особый интерес для прогнозирования изменения качества дренажных вод за счет вовлечения в систему дренажных водопритоков соленых вод из нижних зон гидрогеологического разреза.

В целом, представленный материал продемонстрировал довольно широкие возможности аналитических методов интерпретации данных разноплановых опытно-фильтрационных работ на конкретном производственном объекте, чему способствовало, в частности, привлечение современного программного комплекса ANSDIMAT. По крайней мере, не вызывает сомнения, что такого рода анализ должен предшествовать или сопровождать численные решения геофильтрационных задач на сетках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атрощенко Ф.Г., Филин Р.А., Шкиль И.Э.* Оптимизация системы осушения при разработке южной группы трубок месторождения им. М.В. Ломоносова открытым способом // Горный журнал. 2012. № 7. С. 35–40.
2. *Кольцова Е.И.* Оценка влияния обводненности на устойчивость откосов уступов на карьерах месторождения алмазов им. Ломоносова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 9. С. 207–209.
3. *Мироненко В.А., Шестаков В.М.* Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1974. 204 с.
4. *Синдаловский Л.Н.* Аналитическое моделирование опытных опробований водоносных пластов и скважинных водозаборов (программный комплекс ANSDIMAT). Санкт-Петербург: Наука, 2014. 520 с.
5. *Синдаловский Л.Н.* Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-ПбУ, 2006. 769 с.
6. *Филин Р.А., Потанов А.А., Атрощенко Ф.Г., Макушенко М.Е.* Опыт проведения откачек в слоистых толщах (на примере Архангельской алмазодобывающей провинции) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2016. Вып. 3. С. 24–39.
7. *Фисенко Г.Л., Мироненко В.А.* Дренаж карьерных полей. М.: Недра, 1972. 185 с.
8. *Шкиль И.Э.* Опыт эксплуатации дренажного контура водопонижающих скважин на карьере трубки Архангельской // Горный журнал. 2009. № 10. С. 13–14.
9. *Шкиль И.Э., Поршнева А.И., Малов А.И.* Изменение гидрогеоэкологических условий при осушении карьеров южной группы трубок месторождения им. М.В. Ломоносова // Проблемы недропользования. 2016. № 3. С. 105–114.
10. *Юзмухаметов Р.Н.* Из истории открытия месторождения алмазов имени Ломоносова // Вестник северного (арктического) федерального университета. 2010. № 3. С. 32–37.
11. *Cooper H.H., Jacob C.E.* A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American Geophysical Union. American Geophysical Union (AGU); 1946. 27(4). P. 526.
12. *Maliva R.G.* Aquifer Characterization Techniques. Springer Hydrogeology. Springer International Publishing, 2016.
13. *Moench A.F.* Transient Flow to a Large-Diameter Well in an Aquifer With Storative Semiconfining Layers // Water Resour. Res. Wiley-Blackwell; 1985 Aug;21(8). P. 1121–1131.

REFERENCES

1. *Atroshchenko F.G., Filin P.A., Shkil I.E.* Optimizacija sistemy osushenija pri razrabotke juzhnoj gruppy trubok mestorozhdenija im. M.V. Lomonosova otkryтым sposobom [Optimization of dewatering system of open pit development of M.V. Lomonosov diamond deposit southern pipes]. *Gornyi zhurnal*, 2012, no 7, pp. 35–40. (In Russ.).
2. *Koltsova E.I.* Ocenka vlijanija obvodnennosti na ustojchivost' otkosov ustupov na kar'erah mestorozhdenijaalmazov im. Lomonosova [Evaluation of water content on pit walls stability at Lomonosov diamond deposit]. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, 2003, no 9, pp. 207–209. (In Russ.).
3. *Mironenko V.A., Shestakov V.M.* Teorija i metody interpretacii opytно-fil'tracionnyh rabot [Theory and methods of pumping test analysis and interpretation]. Moscow, Nedra, 1974. 204 p.
4. *Sindalovskiy L.N.* Analiticheskoe modelirovanie opytных oprobovanij vodonosnyh plastov i skvazhinnyh vodozaborov (programmnyj kompleks ANSDIMAT) [Analytical modeling of aquifer tests and well systems (ANSDIMAT software guide)]. Sankt-Petersburg, Nauka, 2014. 520 p.
5. *Sindalovskiy L.N.* Spravochnik analiticheskikh reshenij dlja interpretacii opytно-fil'tracionnyh oprobovanij [Handbook of analytical solutions for aquifer test analysis]. Sankt-Petersburg, SpBSU, 2006. 769 p.
6. *Filin. R.A., Potapov A.A., Atroshchenko F.G., Makushenko M.E.* Opyt provedenija otkachek v sloistyh tolshah (na primere Arhangel'skoj almazonosnoj provincii)

- [Experimental pumping tests in multilayer aquifers (Arkhangelsk diamond province)]. *Vestnik SPbGU*, 2016. Ser. 7. Vyp. 3, pp.24–39. (In Russ.).
7. Fisenko G.L., Mironenko V.A. Drenazh kar'ernyh polej [Open pit drainage]. Moscow, Nedra, 1972. 185 p.
 8. Shkil I.E. Opyt jekspluatacii drenazhnogo kontura vodoponizhajushih skvazhin na kar'ere trubki Arhangel'skoj [Experience of drainage well operation at Arkhangelsk diamond open pit] *Gornyj zhurnal*, 2009, no10, pp. 13–14. (In Russ.).
 9. Shkil I.E., Porshnev A.I., Malov A.I. Izmenenie gidrogeologicheskikh uslovij pri osushenii kar'erov juzhnoj grupy trubok mestorozhdenija im. M.V. Lomonosova [Change in hydrological environmental conditions caused by dewatering of open pits at southern pipes of M.V. Lomonosov diamond deposit]. *Problemy nedropol'zovaniya*, 2016, no 3, pp. 105–114. (In Russ.).
 10. Yuzmukhametov R.N. Iz istorii otkrytija mestorozhdenija almazov imeni Lomonosova [On the history of Lomonosov diamond pit discovery]. *Vestnik severnogo (arkticheskogo) federal'nogo universiteta*, 2010, no 3, pp. 32–37. (In Russ.).
 11. Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions, American Geophysical Union. American Geophysical Union (AGU); 1946; 27(4): 526.
 12. Maliva R.G. Aquifer Characterization Techniques. Springer Hydrogeology. Springer International Publishing; 2016.
 13. Moench A.F. Transient Flow to a Large-Diameter Well in an Aquifer With Storative Semiconfining Layers. *Water Resour Res.* Wiley-Blackwell; 1985 Aug;21(8):1121–31.

SCALE DEPENDENT PHENOMENA IN FLOW TEST AND MONITORING DATA ANALYSIS (WITH APPLICATION TO HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS AT THE M.V. LOMONOSOV DIMOND DEPOSIT, ARCHANGELSK PROVINCE, RF)

A. A. Dunyshin*, L. N. Sindalovskiy, A. M. Nikulenkov**, V. G. Rumynin*****

* *Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, 7/9 Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, E-mail: dunay-23@hotmail.com*

** *St. Petersburg Department, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Sredniy av., V.O., 41, off. 519, St. Petersburg, 199004 Russia, E-mail: office@hgepro.ru*

The article is devoted to the analysis of data of groundwater field tests (single-well and multi-well tests) and groundwater level monitoring performed at various stages of exploration and development of M.V. Lomonosov diamond deposit in Arkhangelsk region, Russia. Field data interpretation was made using ANSDIMAT software. Considered types of aquifer tests differ from each other by both technical conditions and the duration of hydrodynamic action on the aquifer system. The results obtained show that aquifer parameter values are sensitive to the test type, that is most likely due to the role of scale phenomena.

Conductivity values basing on the single-well tests (160–190 m²/d) proved to be clearly underestimated, while both multi-well test and monitoring observations of longer duration gave similar results (270–350 m²/d). At the same time, the prolonged water withdrawal during the open pit development initiate the groundwater drawdown due to the specific yield in the upper aquifer, that produces the water inflow summing with that due to elastic compression of the main aquifer.

Therefore, the single-well tests data owing to short test period and its limited effect on the aquifer, prove to be sensitive to the hydraulic resistance of the near-screen zone of the pumped well. The resulting conductivity values of the main aquifer turn to be strongly deviated in this case. In contrast, multi-well test allows to exclude the influence of technical drawbacks of wellbore construction and design on test results, and provide reliable appreciation of aquifer conductivity values. However, estimation of additional water withdrawal due to groundwater inflow from the adjacent aquifers is possible only by involving the long-term monitoring observation data. Consequently, groundwater drawdown calculations based on underestimated specific storage values obtained in short aquifer pumping tests can result in overestimation of the radius of influence of open pit water drainage system.

Key words: *Aquifer field test, scale effects/phenomena, M.V. Lomonosov diamond deposit, open pit drainage, groundwater monitoring, ANSDIMAT software.*