DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-61-71 УДК 550.8.02:621.039

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ ИЗ НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН В СЛАБОПРОНИЦАЕМОМ СКАЛЬНОМ МАССИВЕ С УЧЕТОМ ПОТОКА В СТВОЛЕ СОВЕРШЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ»

А. В. Расторгуев, Г. Д. Неуважаев, К. Д. Смирнов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 19 июня 2021 г.

В данной статье представлена обработка кустовых откачек из несовершенных скважин в слабопроницаемом скальном массиве графоаналитическим методом с использованием трехмерного моделирования в программе GMS 10.4. Произведены анализ полученных результатов и сравнение методов интерпретации опытно-фильтрационных работ (ОФР). Выявлены закономерности при модельной интерпретации ОФР и сделаны предложения по улучшению обработки их результатов.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, опытно-фильтрационные работы, скважина, скин-эффект, участок «Енисейский».*

Введение

Опытно-фильтрационные работы играют важную роль для определения фильтрационных параметров водоносных горизонтов. Стандартная методика оценки параметров по ОФР основана на модели Тейса [1], которая была получена на основе допущений, что откачивающая скважина совершенна, с нулевым радиусом, в стволе не происходит накопления воды и потеря напора через фильтр скважины незначительная. На практике это не соответствует реальной ситуации. К тому же на начальном этапе проведения откачки масса воды поступает не из водоносного горизонта, а из объема, первоначально находящегося в обсадной колонне скважины [2]. Интерпретация этих работ не всегда однозначна, имеет некоторые ограничения и в связи с этим требует комплексного подхода.

В сложных гидрогеологических условиях анализ результатов откачек вызывает определенные трудности, связанные со сложностью идентификации расчетной схемы, что обусловлено анизотропным строением толщи и различным характером режима фильтрации [3].

В скальных породах процесс обработки откачек усложняется. Встает вопрос о том, как задавать трещины на модели и как влияет их геометрия на результаты обработки. В работе [4] было приведено полуаналитическое решение для откачки из водоносного горизонта, представленного наклонной зоной повышенной

трещиноватости, окруженной слабопроницаемыми породами. Было обнаружено, что понижение уровня подземных вод в скважине прямо пропорционально зависит от угла наклона водоносного горизонта на начальном этапе откачки и почти не зависит на поздних этапах. Фильтрационные свойства слабопроницаемых пород (матриц) имеют сильное влияние на изменение их уровня на поздних этапах откачки.

Для определения фильтрационных параметров была проведена графоаналитическая обработка двух кустовых откачек, выполненных в 2012 году из скважин, расположенных на территории площадки (куст 1: 2Ц — Р-2 — 2-2 и куст 2: 7Ц — Р-7 — 7-2). Работы проводились на участке «Енисейский». Для оценки параметров структурных элементов были построены трехмерные модели в пределах участков кустовых откачек, на которых проводились опытно-фильтрационные работы.

Описание участка проведения опытно-фильтрационных работ

В гидрогеологическом отношении на участке в верхней части разреза выделяется обводненный горизонт покровных отложений, перекрывающий скальные архейские и протерозойские породы [6]. Фильтрационные свойства водовмещающей среды в районе участка «Енисейский» во многом определяются трещиноватостью, связанной с основными структурными элементами: разрывными нарушениями (представленными преимущественно зонами дробления) и дайками.

АО «Красноярскгеология» на участке «Енисейский» проводило опытно-фильтрационные работы, результаты которых были использованы для настоящего исследования. В ходе работ были выполнены опытные откачки на специально подготовленных двух однолучевых кустах скважин: 2Ц — Р-2 — 2-2 и 7Ц — Р-7 — 7-2. Центральные скважины 2Ц и 7Ц и наблюдательные 7-2 и 2-2 — несовершенные по степени вскрытия пласта, а наблюдательные скважины Р-2 и Р-7 — совершенные. Откачки выполнены с помощью погружного насоса ЭЦВ-4, опущенного на глубину 184 м. Расстояние между скважинами, дебит, ход двух откачек и основные данные по скважинам приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Для интерпретации ОФР использовались как центральные, так и наблюдательные скважины, в которых происходили изменения уровня

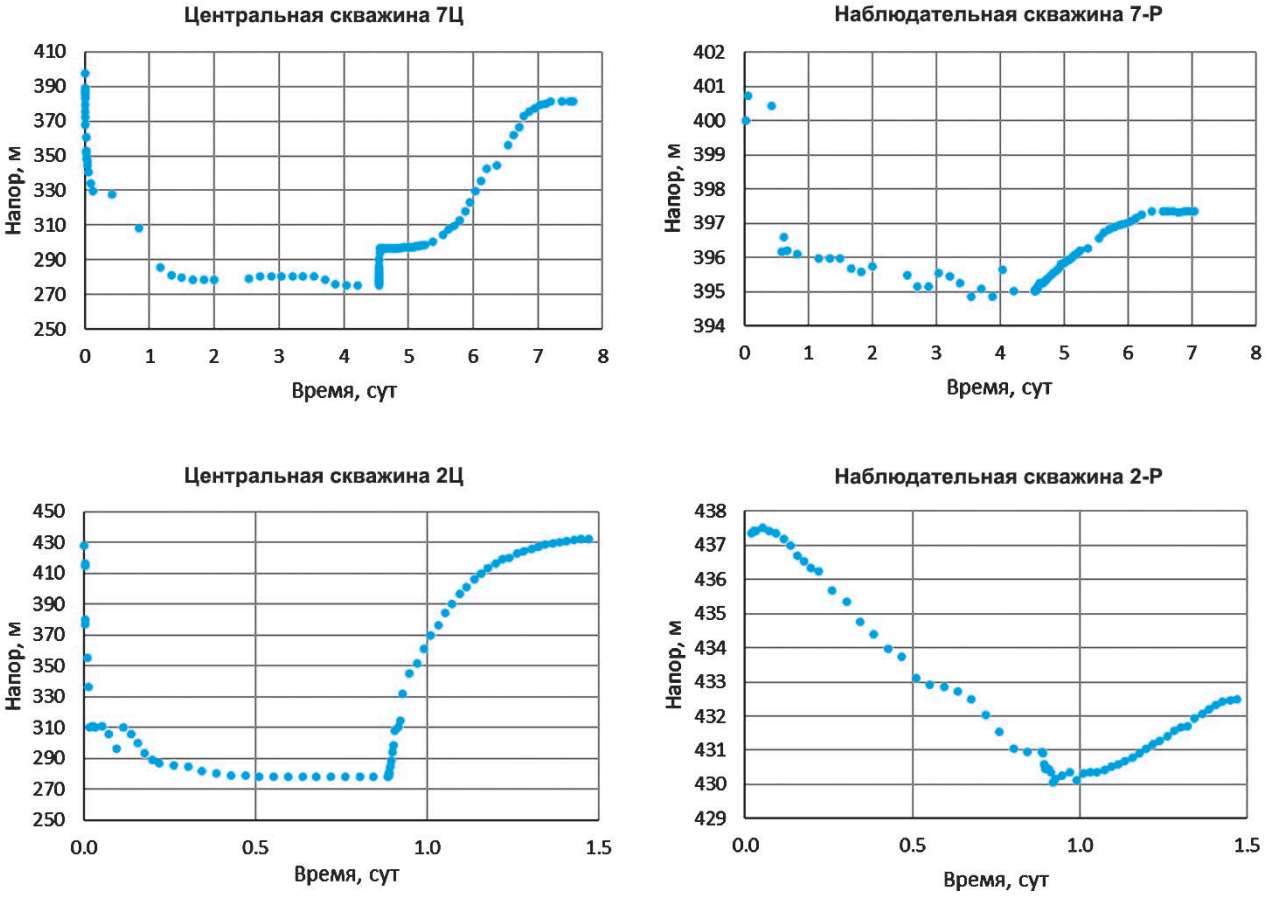


Рис. 1. Ход кустовых откачек 7Ц — 7-Р и 2Ц —2-Р (по данным АО «Красноярскгеология»)

Таблица 1. Основные данные по скважинам кустовых откачек (по данным АО «Красноярскгеология»)

№ скважины	Расстояние от центральной скважины, м	Глубина скважины, м	Интервал опробования, от–до, м	Мощность водоносного горизонта, м	Нст, м	Данные опробования			
						Способ опробования	Продолжительность, ч	Дебит, Q, м³/сут	Понижение S, м
2Ц	0	200	8,4–200	191,6	8,4	центральная скважина	22	9,5	159,8
2-Р	22,6	700	47,9–700	652,1	47,9	набл.			6,58
2-2	31,8	200	7–200	193	7,05	набл.	24		0,19
7Ц	0	200	16,3–200	183,7	16,3	центральная скважина	109	6,8	126,04
7-Р	19,5	700	21,7–700	678,3	21,7	набл.			4,98
7-2	31,3	200	12–200	188	12,03	набл.			0

подземных вод. Данные, полученные по наблюдательным скважинам 7-2 и 2-2, не обрабатывались, так как во время откачки изменений уровня подземных вод в них не наблюдалось.

Графоаналитическая обработка ОФР

Для определения фильтрационных параметров выполнена графоаналитическая обработка двух кустовых откачек из скважин 2Ц и 7Ц, которая производилась по схеме Тейса для изолированного напорного однородного пласта, неограниченного в плане, с одной опытной скважиной и с постоянным расходом. Для обработки были построены полулогарифмические графики временного прослеживания понижения (S, м) и восстановления уровня подземных вод от устья скважины (S', м), указанные на рис. 2 и 3 (S — понижение уровня подземных вод до момента выключения насоса, S' — повышение уровня подземных вод после выключения насоса).

Графики изменения уровня были аппроксимированы уравнением прямой линии по формулам (1)—(3). Аппроксимация производилась вручную. При этом на экспериментальных графиках выбирались участки, имеющие близкий угловой коэффициент как для откачки, так и для восстановления. Из данных уравнений были использованы угловой коэффициент C и свободный член A для расчета фильтрационных параметров: k — коэффициент фильтрации (м/сут), a — пьезопроводность (м²/сут), которые приведены в табл. 2.

Расчетные формулы:

$$T = \frac{0{,}183Q}{C}, \quad (1)$$

$$k = \frac{T}{m}, \quad (2)$$

$$\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2{,}25}, \quad (3)$$

где T — проводимость (м²/сут), Q — дебит центральной скважины (м³/сут), C — угловой коэффициент уравнения аппроксимирующей прямой, A — свободный член уравнения аппроксимирующей кривой, k — коэффициент фильтрации (м/сут), m — мощность водоносного горизонта, a — пьезопроводность (м²/сут).

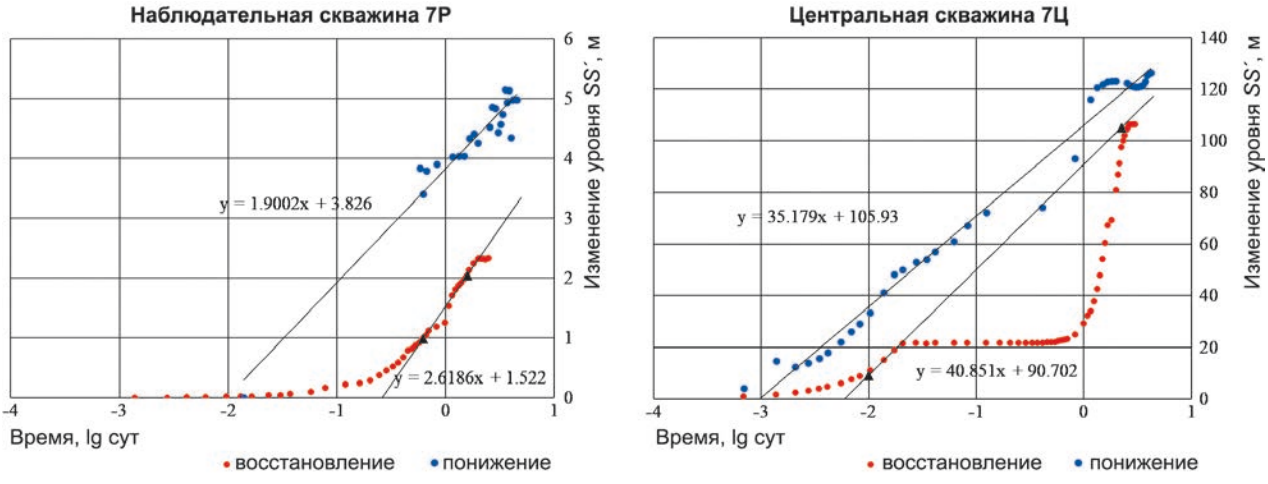


Рис. 2. Графики изменения уровня подземных вод (S, S') для периода понижения и восстановления уровней кустовой откачки по скважинам 7Ц и 7Р

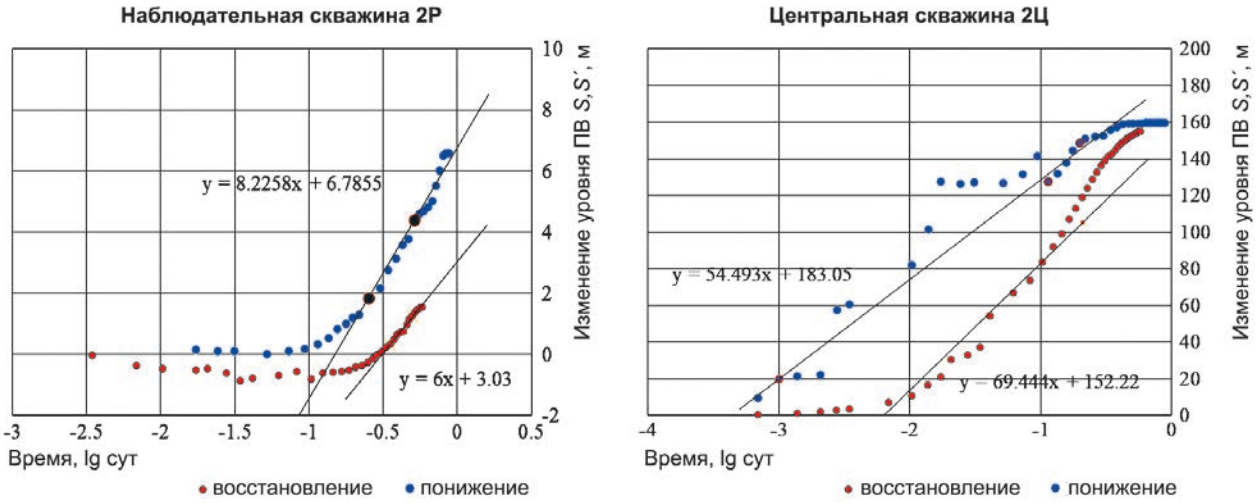


Рис. 3. Графики изменения уровня подземных вод (S, S') для периода понижения и восстановления кустовой откачки по скважинам 2Ц и 2Р

Таблица 2. Расчет фильтрационных параметров

№ скважины	Понижение					Восстановление		
	C	A	T, м²/сут	k, м/сут	a, м²/сут	C	T, м²/сут	k, м/сут
2Ц	54,5		0,03	$4{,}9\cdot10^{-5}$		69,4	0,03	$3{,}8\cdot10^{-5}$
2Р	8,2	6,8	0,21	$3{,}2\cdot10^{-4}$	1525,1	6,0	0,29	$4{,}4\cdot10^{-4}$
7Ц	35,2		0,04	$5{,}2\cdot10^{-5}$		40,9	0,03	$4{,}5\cdot10^{-5}$
7Р	1,9	3,8	0,65	$9{,}7\cdot10^{-4}$	16900,0	2,6	0,48	$7{,}1\cdot10^{-4}$

Таблица 3. Результаты определения коэффициента фильтрации АО «Красноярскгеология»

№ скважины	Коэффициент фильтрации (k), м/сут		Пьезопроводность (a), м²/сут
	Понижение	Восстановление	
7Ц	$1{,}90\cdot10^{-4}$	$1{,}60\cdot10^{-4}$	
7Р	$1{,}14\cdot10^{-3}$	$1{,}18\cdot10^{-3}$	$5{,}00\cdot10^{4}$
2Ц	$1{,}60\cdot10^{-4}$	$1{,}10\cdot10^{-4}$	
2Р	$3{,}50\cdot10^{-4}$	$2{,}30\cdot10^{-4}$	1620

Из полученных выше результатов можно сделать следующий вывод: обработка аналитическим способом пригодна только по данным наблюдательных скважин. На их графиках выделялись участки, которые подчинялись логарифмической зависимости, что не наблюдалось на графиках центральных скважин. Это объясняется влиянием скин-эффекта центральной скважины, который возникает из-за различия фильтрационных параметров между прискважинной зоной и водовмещающими отложениями водоносного горизонта. Таким образом, за основу необходимо брать результаты, полученные при обработке данных по наблюдательным скважинам.

Для сравнения в табл. 3 приведены результаты, полученные АО «Красноярскгеология». Метод обработки данных не отличался, поэтому расхождения в результатах незначительные, в пределах погрешности.

Полученные значения фильтрационных параметров могут быть использованы для модельной интерпретации ОФР.

Модельная интерпретация ОФР

Для оценки параметров структурных элементов были построены трехмерные модели строения участка «Енисейский» (рис. 4), где были проведены опытно-фильтрационные работы. В результате смоделированы две кустовые откачки из скважин 7Ц и 2Ц с наблюдательными 7Р и 2Р соответственно. Для моделирования использовалась программа Groundwater Modeling System 10.4 [7] (Система моделирования подземных вод, GMS) — комплексная графическая пользовательская среда для моделирования подземных вод. Вся система GMS состоит из графического интерфейса пользователя (программа GMS) и ряда кодов анализа (MODFLOW, MT3DMS и т. д.). В данной программе есть необходимый для скважин Multi-Node Well (MNW2) модуль [7], который позволяет задавать скважину сразу в несколько ячеек по глубине. Этот модуль применим для несовершенных по степени и характеру вскрытия скважин, модельная реализация которых требует подробной

вертикальной дискретизации, когда скважина реализуется в нескольких модельных слоях (такой является центральная скважина). Данный модуль позволяет получить общий (единый) уровень воды в скважине, что делает его пригодным для модельной реализации наблюдательных скважин, а также учитывает несовершенство скважины по характеру вскрытия (скин-эффект).

Трехмерное моделирование ОФР

Трехмерная модель построена в расчетной области размером 500 × 500 × 700 м. Сетка прямоугольная. Размер ячеек сетки 10 × 10 × 10 м, со сгущением к скважинам до 1,8 × 10 × 10 м, выбран исходя из необходимости задания на модели геологических элементов, центральных и наблюдательных скважин. Общий вид модели приведен на рис. 4. В соответствии с геологическими разрезами, на которых выделены геологические разности, на модели также выделены различные геологические структурные элементы: дайки, зоны повышенной трещиноватости, кора выветривания, гнейсы.

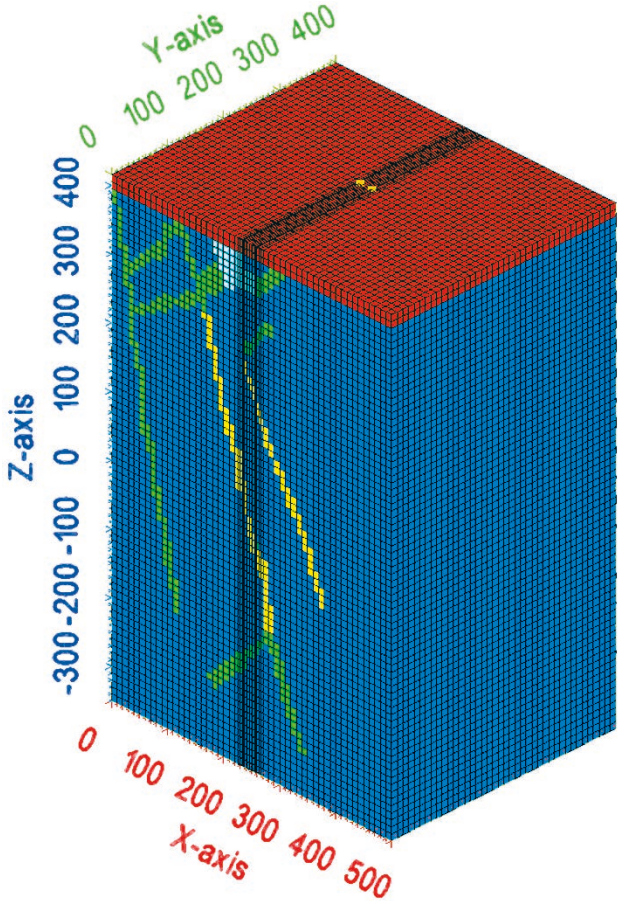


Рис. 4. Трехмерная модель опытной откачки из скважины 7Ц на участке «Енисейский»

Далее для обозначения гнейсов будет использоваться термин «матрица» (рис. 5, 6). Данным элементам в ходе калибровки модели присваивались различные фильтрационные параметры. Ее границы были удалены от скважин на расстояние, превышающее радиус влияния откачки.

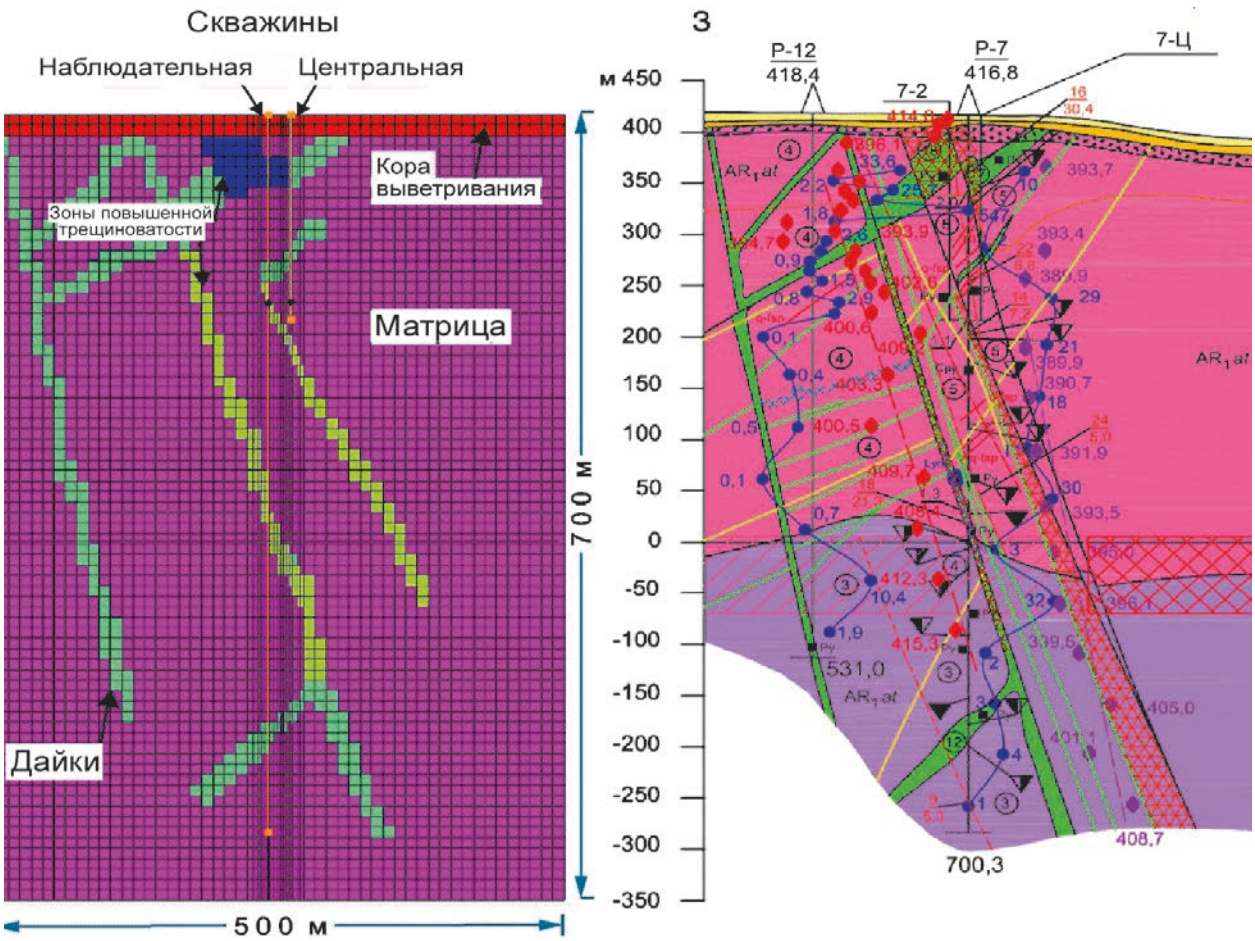
В ходе моделирования и верификации модели с использованием фактических данных, полученных в ходе опытно-фильтрационных работ, можно отметить следующее: положение уровня подземных вод в наблюдательной скважине зависит в большей степени от емкостных параметров элементов геологического строения, нежели от коэффициента фильтрации. Это связано с тем, что процесс откачки полностью идет в нестационарном режиме, поэтому в ходе калибровки удельная водоотдача (specific storage — Ss) менялась редко и была установлена в матрице10^{-7} $м^{-1}$, — только при таких значениях можно было достичь наиболее схожего понижения в наблюдательных скважинах.

Скин-эффект (коэффициент фильтрации прискважинной зоны) у центральной скважины сильно влияет на понижение в ней уровня подземных вод. На рис. 7 приведено сравнение понижения уровня подземных вод центральной скважины 7Ц при различных коэффициентах фильтрации прискважинной зоны. В наблюдательной скважине скин-эффект не влияет на результаты моделирования.

По этим данным был установлен набор параметров (табл. 4), при котором рассчитанные на модели изменения уровня подземных вод в скважинах при откачке максимально совпадали с наблюдаемыми при проведении кустовых откачек. Скин-эффект у наблюдательной скважины был принят как 0,1 м/сут, у центральной — 0,00075 м/сут. Наиболее оптимальный

Таблица 4. Параметры моделей

Геологический элемент	Модель куста 2Ц – 2Р		Модель куста 7Ц – 7Р	
	Коэф. фильтр. (м/сут)	Удельная водоотдача, Ss ($м^{-1}$)	Коэф. фильтр. (м/сут)	Удельная водоотдача, Ss ($м^{-1}$)
Матрица	0,0001	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$	0,0051	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$
Зоны повышенной трещиноватости 1	0,005	$5{,}00 \cdot 10^{-7}$	0,01	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$
Зоны повышенной трещиноватости 2	0,0008	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$	–	–
Дайки	–	–	0,00001	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$
Кора выветривания	0,005	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$	0,01	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q — Четвертичные отложения нерасчлененные. Суглинки песчанистые с редкими обломками выветрелых пород (5—8 м)

P3-N1 — Кора выветривания. Глинисто-дресвяно-щебнистые отложения (4, 1—8,0 м}

Позднерифейские субвулканические и гидротермальные образования

Жилы кальцитовые (са), кварц-кальцитовые (q-са) (а), зоны карбонатного прожилкования (б)

Шошинский дайковый комплекс. Дайки долеритов, трахидолеритов в масштабе (а) и вне масштаба (б) разреза

Жилы кварцевые, сульфидно-кварцевые (а), зоны тонкого кварцевого прожилкования (б)

Токминский дайковый комплекс. Дайки метадолеритов в масштабе (а) и вне масштаба (б) разреза

Зоны окварцевания

q-fsp — Жилы кварц-полевошпатовые

Раннепротерозойские интрузивные образования

Таракский комплекс. Гранито-гнейсы, граниты , гранодиориты

AR1at — Нижний архей. Атамановская метаморфическая серия. Плагиогнейсы , гнейсы кордиерит-биотитовые (а), биотитовые (б), их переслаивание (в)

Разрывные нарушения

Геологические границы установленные (а) и предполагаемые (б)

Зоны дробления в масштабе (а) и вне масштаба (б) разреза. Цифры — их стволовая мощность , м

Зоны повышенной трещиноватости в масштабе (а) и вне масштаба (б) разреза. Цифры — модуль трещиноватости (в числителе) и стволовая мощность, м (в знаменателе)

Разрывные нарушения предполагаемые

Маломощные зоны милонитизации пород (а), участки подорванных контактов пород (б}

Среднее значение модуля трещноватости (трещин/пог. м} для блоков пород

Блоки повышенной проницаемости пород с увеличенным средним значением модуля трещиноватости

Участки развития открытой трещиноватости по геологическим (а), геофизическим (б) данным и их совокупности (в)

Участки установленного и предполагаемого водопритока

Граница зоны окисления

Графики и значение коэффициента фильтрации $K_ф$ по стволу скважины, пх10^{-4} м/сут

405,0 — Среднее значение напора для интервала между пакерами в стволе скважины, м

Линия тренда изменения напора

Зона приповерхностной экзогенной дезинтеграции пород

Py, Cpy — Участки развития сульфидной вкрапленности — пирита (P_y), халькопирита (C_{py})

Lym — Участки развития оксидов железа — лимонита (Lym), гематита (Gmt) на глубоких интервалах скважин

Целевой горизонт

Р-6 / 399,0 / 700,0 — Буровые скважины, их номера и абсолютная отметка устья, м. Внизу — глубина скважины, м

Рис. 5. Разрез трехмерной модели кустовой откачки из скважины 7Ц (слева) и выкопировка геологического разреза по скважинам Р12 — Р7 — Р6 — Р11 — Р8 (справа) с условными обозначениями участка «Енисейский». Составили О. А. Морозов, А. В. Расторгуев (по данным [Озерский, Заблоцкий, 2011; Караулов, Заблоцкий, 2015; Гупало и др., 2016])

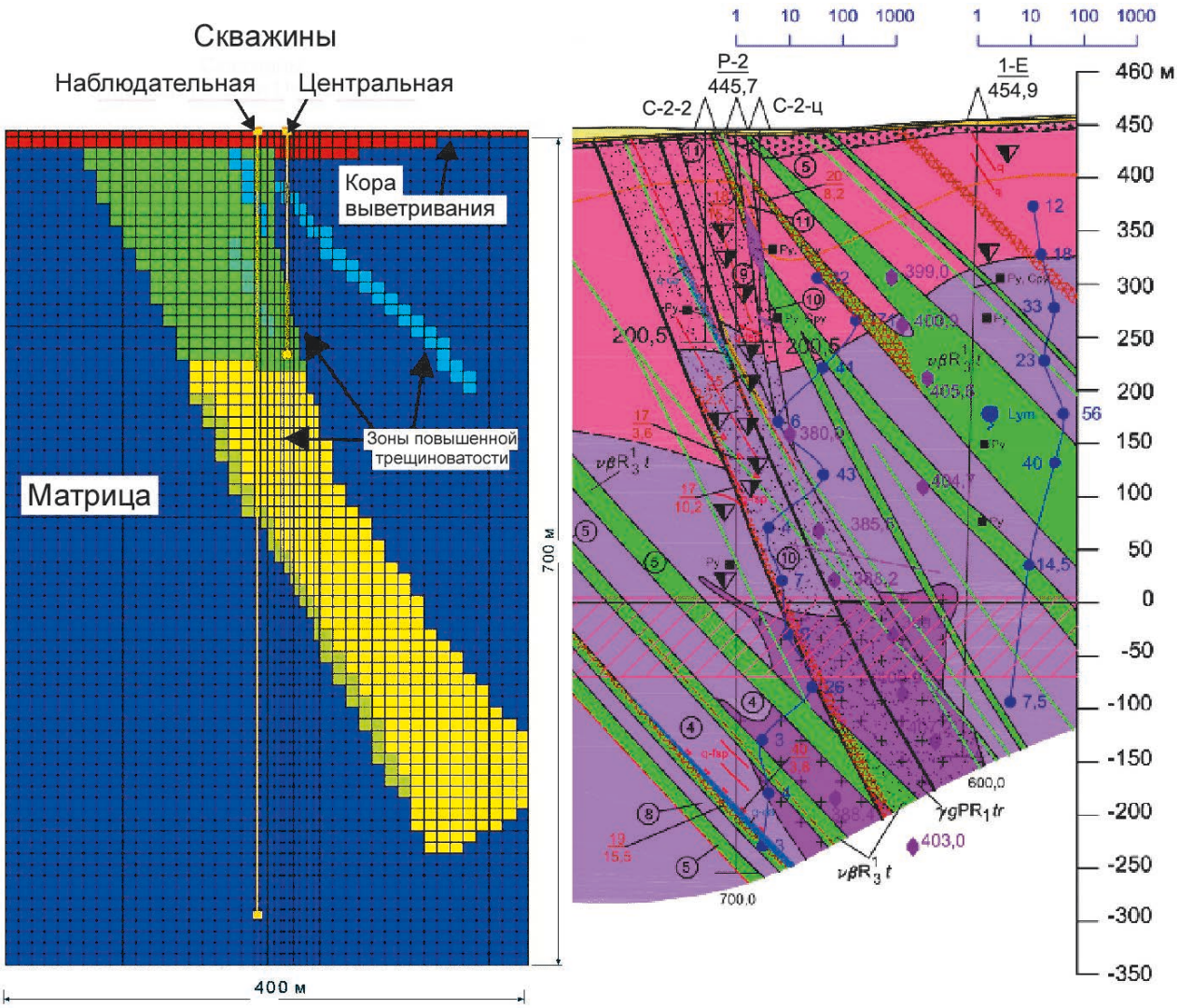


Рис. 6. Разрез трехмерной модели кустовой откачки из скважины 2Ц (слева) и выкопировка геологического разреза по скважинам Р4 — Р9 — Р13 — Р2 — 1Е (справа) участка «Енисейский»

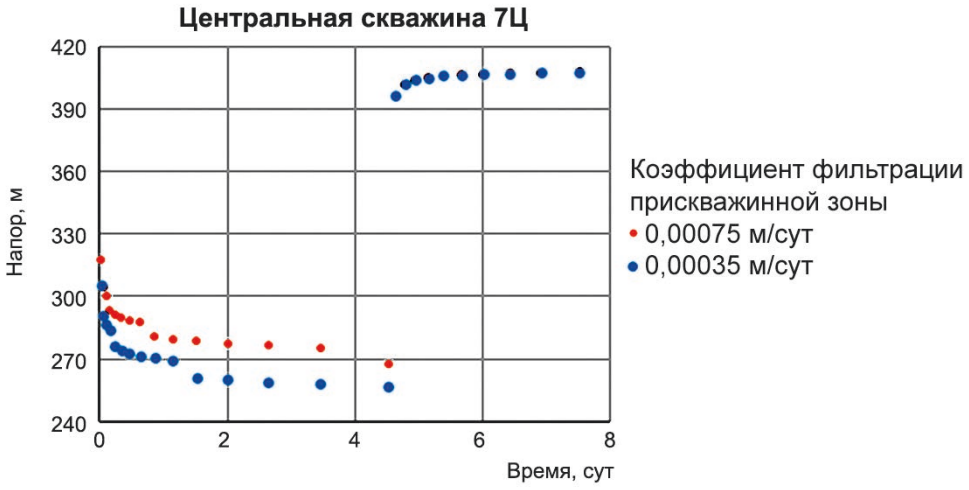


Рис. 7. График временной зависимости напора подземных вод центральной скважины 7Ц в ходе откачки при разных значениях коэффициента фильтрации прискважинной зоны

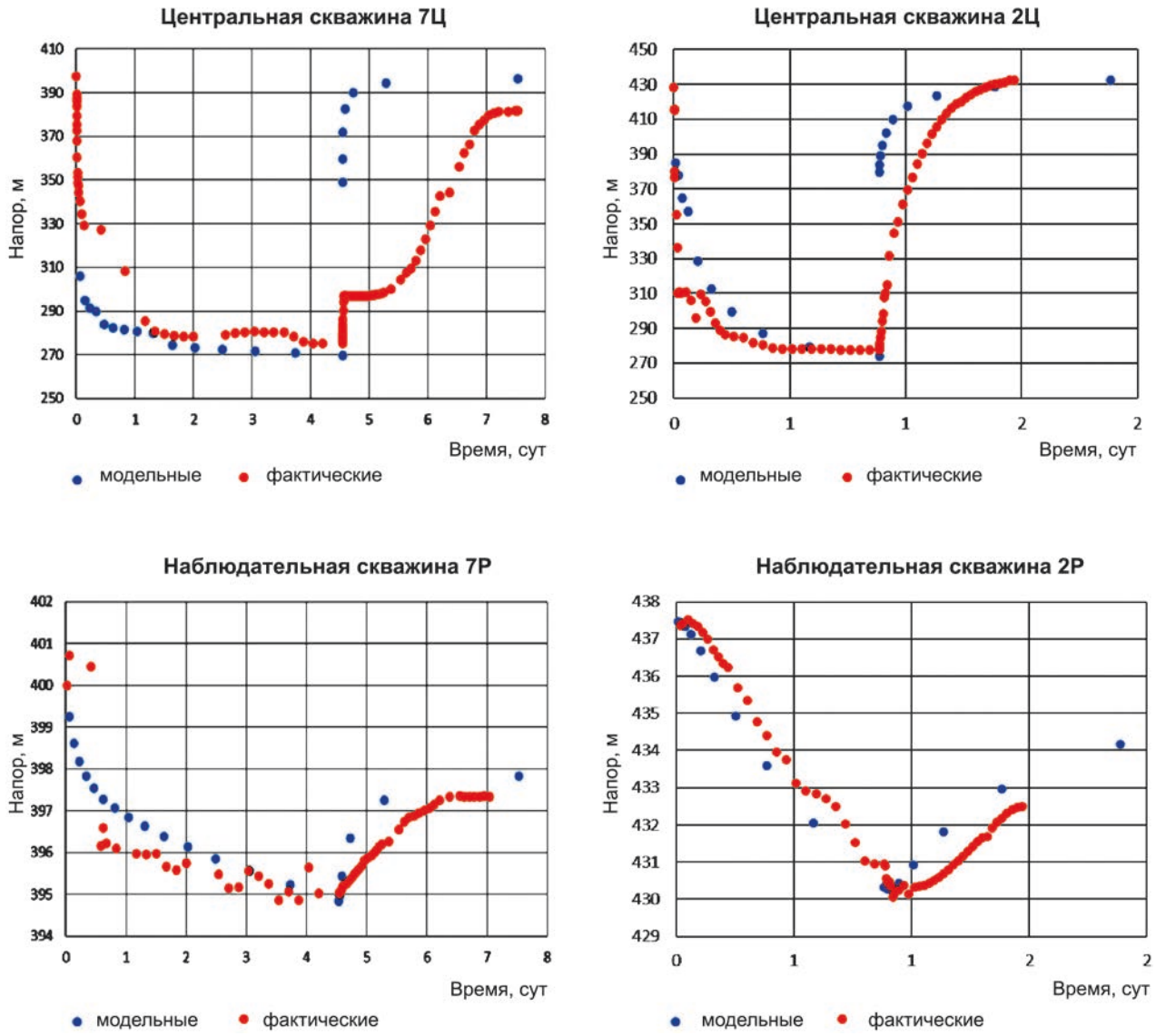


Рис. 8. Сравнение модельных и наблюдаемых понижений уровня подземных вод в кустах скважин 7Ц – 7Р и 2Ц – 2Р

вариант сходимости модели с наблюдаемыми данными для кустовых откачек 7Ц и 2Ц приведен на рис. 8.

В ходе выполненной работы было исследовано влияние наблюдательной скважины 7Р на результаты моделирования. Для этого был построен график зависимости модельного напора в наблюдательной скважине от глубины (рис. 9), из которого видно, что эти величины прямо пропорциональны. Это говорит о том, что в ней наблюдается восходящий поток подземных вод, который создает дополнительную подпитку, подтягивая с глубины некоторое количество воды. На рис. 10 приведено сравнение динамики изменения уровня подземных вод в центральной скважине при откачке с наблюдательной скважиной и без нее. При моделировании без наблюдательной скважины понижение на конец откачки увеличивается на 4 м. Таким образом, если не учитывать наблюдательную скважину при моделировании откачки, то коэффициенты фильтрации будут завышены.

Заключение

По итогам данного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты аналитической обработки данных, полученных в ходе определения коэффициента фильтрации АО «Красноярскгеология» (табл. 3), почти совпадают с расчетами, сделанными авторами. Небольшое различие возникает из-за погрешности этого метода. Как в результатах данной статьи, так и по результатам других исследователей коэффициент фильтрации, определенный по центральным скважинам, занижен вследствие того, что данный аналитический метод не учитывает скин-эффект.

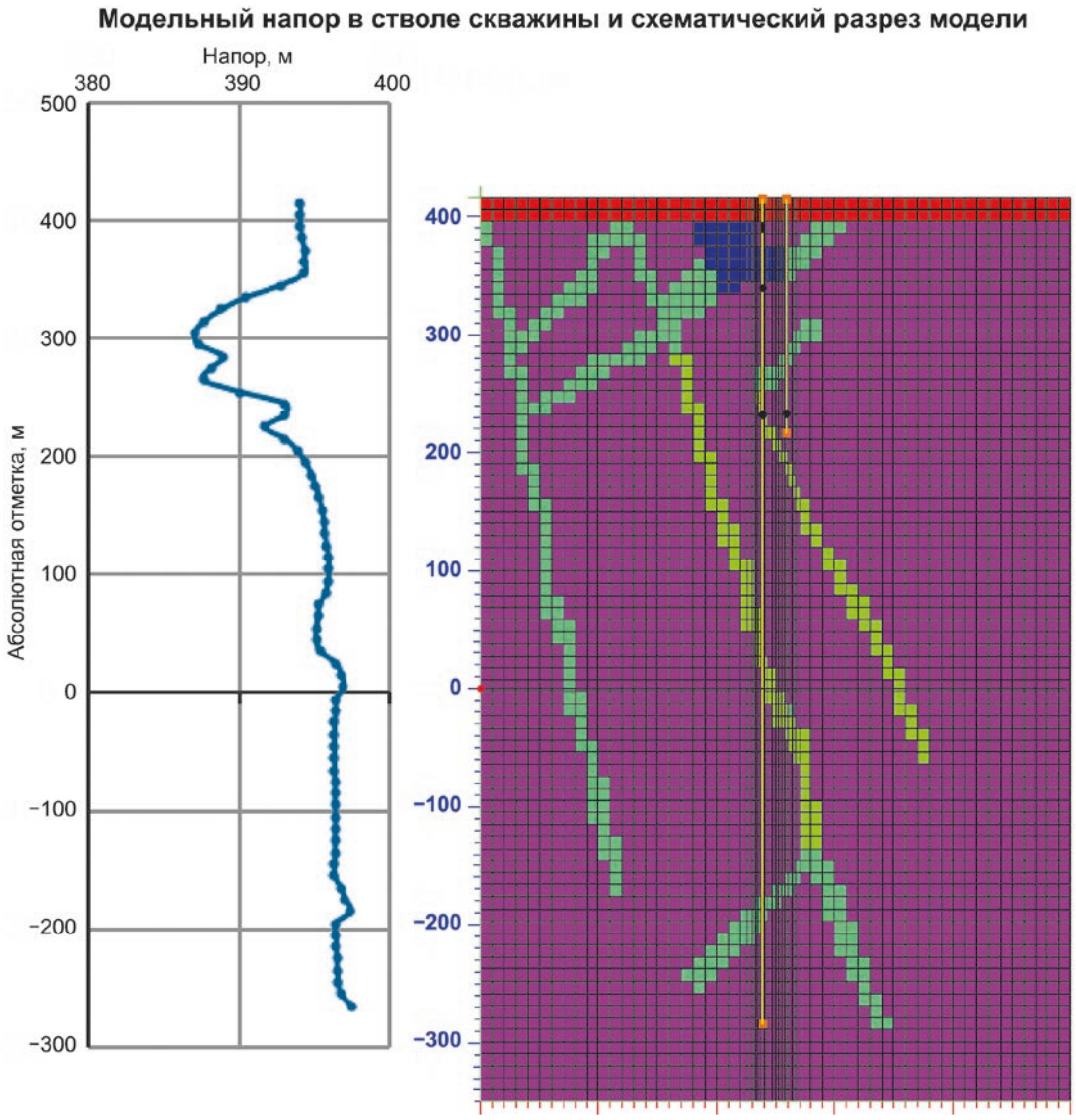


Рис. 9. Модельный напор вблизи ствола скважины и схематический разрез модели

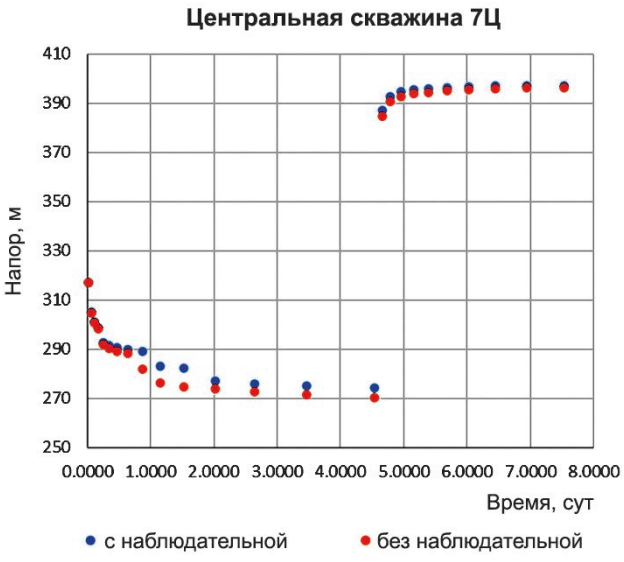


Рис. 10. График изменения напора в центральной скважине при откачке с наблюдательной скважиной и без нее

2. Численное моделирование позволило более детально учесть условия трещиноватой толщи — задать структурные элементы. Это привело к тому, что коэффициент фильтрации матрицы оказался в 2—3 раза ниже, чем при аналитической обработке (табл. 4). В этом случае большая часть водопроводимости оказалась связанной не с матрицей, а со структурными элементами. Проведенное исследование позволило дать оценку фильтрационных свойств структурных элементов и наблюдательных скважин, что показало необходимость их учета при моделировании.

3. При сравнении графиков водопонижений, рассчитанных на модели и наблюдаемых при выполнении откачек, можно сделать вывод о том, что модель повторяет фактический ход откачки, а различия наблюдаются при восстановлении уровня подземных вод. Модельное

повышение уровня более резкое, чем в опытных данных. Вероятно, это можно объяснить тем, что в модели не учитывается взаимосвязь потока в трещиноватой зоне и матрице. На практике такое влияние взаимосвязи прослеживается, т. к. более проницаемая трещиноватая зона дренируется при откачке и получает питание из матрицы, которое замедлено из-за ее низких фильтрационных свойств. После отключения насоса, в начале периода восстановления уровня подземных вод в скважине, модель не учитывает эту взаимосвязь, в результате чего уровень подземных вод в скважине быстро повышается. В дальнейшем связь матрицы и трещиноватых зон может быть реализована с помощью введения дополнительных специальных коэффициентов водообмена, учитывающих взаимосвязь между ними.

4. Если при моделировании не брать в расчет специальное условие на наблюдательных скважинах с помощью пакета Multi-Node Well (MNW2) [7], результаты по определению коэффициентов фильтрации могут быть завышены. Это объясняется тем, что наличие совершенной скважины приводит к тому, что появляется канал (он и реализуется с помощью MNW2), который объединяет всю толщу и дает дополнительную подпитку.

Трехмерное численное моделирование позволяет определить коэффициенты фильтрации основных структурных элементов, которые, по представлениям авторов, являются наиболее важными гидрогеологическими характеристиками массива. Они необходимы для построения геофильтрационных моделей, являющихся основой для последующих геомиграционных прогнозов. Подтвердить или опровергнуть полученные предварительные результаты помогут поинтервальные нагнетания, которые планируется провести в ближайшее время на участке «Енисейский».

Литература

1. *Theis C. V.* The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 16. Iss. 2. Pp. 519—524.
2. *Holub J. и др.* Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia // International Journal of Water. 2019. № 1 (13). Pp. 1—11. DOI: 10.1504/IJW.2019.10018434.
3. *Konikow L. F., Hornberger G. Z., Halford K. J., Hanson R. T.* Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A30. 2009. 67 p.
4. *Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М. : Недра, 1973. 304 с.
5. *Zhao Y., Zhang Y. K., Liang X.* Analytical solutions of three-dimensional groundwater flow to a well in a leaky sloping fault-zone aquifer // Journal of Hydrology. 2016. № 539. Pp. 204—213. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.029.
6. *Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д.* Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
7. GMS10.4.URL:https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction.

Информация об авторах

Расторгуев Александр Владилинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: alvr9@mail.ru.

Неуважаев Георгий Дмитриевич, младший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: neyvazhaev@ibrae.ac.ru.

Смирнов Кирилл Дмитриевич, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: atomicks96@mail.ru.

Библиографическое описание статьи

Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д., Смирнов К. Д. Интерпретация опытно-фильтрационных работ из несовершенных скважин в слабопроницаемом скальном массиве с учетом потока в стволе совершенной наблюдательной скважины на примере участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. 2021. № 3 (16). С. 61—71. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-61-71.

INTERPRETATION OF GROUNDWATER INFLOW TESTING FROM IMPERFECT WELLS IN LOW-PERMEABLE ROCK MASS CONSIDERING A FLOW IN THE WELLBORE OF A PERFECT OBSERVATION WELL BASED ON THE YENISEISKIY SITE CASE STUDY

Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D., Smirnov K. D.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on June 19, 2021

The paper presents the processing of 2 cluster pumpings from imperfect wells inside a low-permeable rock mass. The processing was done using graphical-analytical method with three-dimensional modeling in GMS 10.4 software. The results obtained were analyzed and the interpretation methods of groundwater inflow testing (GIT) were compared. The paper identifies common patterns in the model GIT interpretation with some assumptions made on how to improve the processing of their results.

Keywords: *radioactive waste, GIT (groundwater inflow testing), well, skin effect, Yeniseiskiy site.*

References

1. Theis C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Transactions, American Geophysical Union,* 1935, vol. 16, iss. 2, pp. 519—524.

2. Holub J. et al. Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. *International Journal of Water,* 2019, no. 1 (13), pp. 1—11. DOI: 10.1504/IJW.2019.10018434.

3. Konikow L. F., Hornberger G. Z., Halford K. J., Hanson R. T. *Revised multi-node well (MNW2) package for MODFLOW ground-water flow model:* U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A30. 2009. 67 p.

4. Borevsky B. V., Samsonov B. G., Yazvin L. S. *Metodika opredeleniya parametrov vodonosnykh gorizontov po dannym otkachek* [Methods providing the identification of aquifer parameters according to pumping data]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 304 p.

5. Zhao Y., Zhang Y. K., Liang X. Analytical solutions of three-dimensional groundwater flow to a well in a leaky sloping fault-zone aquifer. *Journal of Hydrology,* 2016, no. 539, pp. 204—213. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.05.029.

6. Morozov O. A., Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D. Otsenka sostoyaniya geologicheskoy sredy uchastka Yeniseyskiy (Krasnoyarskiy kray) [Assessing the State of the Geological Environment at the Yeniseyskiy Site (Krasnoyarsk Region)]. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste,* 2019, no. 4 (9), pp. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.

7. *GMS10.4.URL:https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction.*

Information about the authors

Rastorguev Alexander Vladilinovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: alvr9@mail.ru.

Neuvazhaev Georgiy Dmitrievich, Junior research associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: neyvazhaev@ibrae.ac.ru.

Smirnov Kirill Dmitrievich, Research Engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: atomicks96@mail.ru.

Bibliographic description

Rastorguev A. V., Neuvazhaev G. D., Smirnov K. D. Interpretation of Groundwater Inflow Testing from Imperfect Wells in Low-Permeable Rock Mass Considering a Flow in the Wellbore of a Perfect Observation Well Based on the Yeniseiskiy Site Case Study. *Radioactive Waste,* 2021, no. 3 (16), pp. 61—71. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-61-71. (In Russian).