ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5–1):92–106
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 556.3.06 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_92

ОБОСНОВАННОСТЬ НЕОБХОДИМЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Ю. К. Иванов

Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН (ИГГ УрО РАН), Екатеринбург, Россия, director@igg.uran.ru

Аннотация: отработка обводненных месторождений твердых полезных ископаемых невозможна без проектных решений по их осушению. Прогнозные расчеты дренажных мероприятий основываются на гидрогеологических исследованиях. Основным видом получения исходных данных для расчета водопритоков являются опытно-фильтрационные работы. Несмотря на то, что достоверная гидрогеологическая информация может быть получена только по результатам кустовых откачек, в практике геологоразведочных и проектных работ изыскатели часто ограничиваются опробованием одиночных скважин. В статье рассматриваются причины и следствие формального подхода к опытно-фильтрационным работам как части инженерно-геологических изысканий. Показаны недостатки нормативно-методических документов, на основании которых становится возможным сокращать виды и объемы опытно-фильтрационных исследований. Приводятся примеры опытно-фильтрационных работ на месторождениях с получением ограниченных и непредставительных исходных данных по результатам одиночных откачек, на основании которых делался ошибочный прогноз водопритоков и соответственно дренажного оборудования. Автором отмечается, что использование специализированных компьютерных программ по обработке опытно-фильтрационных работ неэффективно без предварительного квалифицированного отбора концептуальной модели для выбора расчетной схемы. Особенно в части попыток получить по результатам одиночных откачек весь диапазон гидродинамических параметров.

Ключевые слова: подземные воды, месторождение полезных ископаемых, коэффициент водопроводимости, скин-эффект, перетекание, опытная откачка, кустовая откачка, одиночная откачка, компьютерные методы, дериватив.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (гос. регистрации № АААА-А18–118052590028–9).

Для цитирования: *Иванов Ю. К.* Обоснованность необходимых гидрогеологических исследований при разведке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–1. — С. 92–106. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_92.

Validity of the necessary hydrogeological studies in the exploration of solid minerals deposits

Yu. K. Ivanov

A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, director@igg.uran.ru

© Ю. К. Иванов. 2022

Abstract: The development of flooded mineral deposits is impossible without designing solutions for their drainage. Projected calculations of drainage measures are based on hydrogeological studies. The main type of obtaining initial data for calculating water flows is pumping tests. Despite the fact that reliable hydrogeological information can be obtained only from the results of interference tests, in the practice of geological exploration and design work, researchers are often limited to testing single wells. The article discusses the causes and consequences of the formal approach to pumping tests as part of engineering and geological surveys. The shortcomings of normative and methodological documents are shown, based on which it becomes possible to reduce the types and volumes of pumping tests studies. Examples of pumping tests at deposits with obtaining limited and unrepresentative initial data on the results of single pumping operations, on the basis of which a false forecast of water flows and, accordingly, drainage equipment was made, are given. The author notes that the use of specialized computer programs for processing pumping testsis ineffective without a preliminary qualified selection of a conceptual model for choosing a calculation scheme. Especially in terms of attempts to obtain the entire range of hydrodynamic parameters based on the results of single pumps.

Key words: underground water, mineral deposit, transmissivity, wellbore skin, leakage factor, pumping test, interference tests (multiple observation wells test), single pumping test, computerized techniques, derivative.

Acknowledgements: The research was carried out within the framework of the topic of the state task of the IGG Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (state registration No. AAAA18-118052590028–9).

For citation: Ivanov Yu. K. Validity of the necessary hydrogeological studies in the exploration of solid minerals deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5–1):92–106. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_92.

Введение

В соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года прогнозируется устойчивый рост разведки и добычи твердых полезных ископаемых. В первую очередь это относится к драгоценным металлам и металлам платиновой группы (МПГ). В структуре запасов России данные месторождения в основном локализованы в углеродсодержащих терригенных и терригенно-карбонатных отложениях, а также приурочены к вулканогенно-плутоническим поясам. При этом на большинстве месторождений вмещающие структуры обводнены и имеют достаточно сложные гидрогеологические условия.

Согласно существующим требованиям, разработка любого обводненного месторождения полезных ископаемых должна быть обеспечена предпроектными и проектными решениями по возможности и способам осушения месторождения, а также прогнозом по влиянию водоотлива на окружающую среду. Подземные воды при ведении горных работ оказывают свое влияние не только напрямую через водопритоки, но и косвенно, через изменение напряженно-деформированного состояния массива, особенно при напорных режимах подземных вод [1].

Задачи гидрогеологического обеспечения добычи твердых полезных ископаемых указаны в ряде основных нормативно-методических документов [2, 3]. В соответствии с этими требованиями «полнота изученности гидрогеологических условий месторождения и полученной информации должна

обеспечивать надежность расчета предполагаемых водопритоков в горные выработки, оценку их влияния на условия разработки месторождения и, при необходимости, проектирование мероприятий по его осушению» [3].

Получение необходимого количества исходных гидрогеологических параметров обуславливает проведение комплекса работ, включающего определенные виды и объемы.

В первую очередь это опытно-фильтрационные работы, по результатам которых получают значения проводимости и емкости вмещающих пород. Данные параметры — основные для прогноза величины водопритока в горные выработки.

Методы

Важнейшими видами опытно-фильтрационных работ (ОФР) являются одиночные и кустовые откачки. При одиночной откачке отсутствуют наблюдательные скважины и замеры проводятся в опробуемой скважине. При кустовых откачках кроме центральной (опытной) скважины вблизи неё сооружаются наблюдательные скважины на разных расстояниях и в количестве от одной до 3—12 и более.

Назначение одиночной откачки — получение только ориентировочных параметров и приблизительных прогнозных решений, на основании которых должны обосновываться устройство и продолжительность кустовых откачек [4]. Необходимо отметить, что в соответствии со стандартом (ГОСТ 23278—2014) только кустовая откачка применяется как основной и обоснованный метод получения необходимых для прогноза исходных параметров водоносных горизонтов и комплексов.

Также, согласно приказу [2], в состав материалов по подсчету запасов твердых полезных ископаемых должны быть включены данные о показателях фильтрационных и емкостных свойств водоносных пород, позволяющих принять обоснованные проектные решения по осушению геологического массива. При соответствующей гидрогеологической обстановке кроме получения фильтрационных и емкостных параметров в составе проектных материалов необходимы работы по выявлению гидравлической связи между рудовмещающими и смежными водоносными пластами и характеристика данной связи (параметр перетекания).

Перечисленные выше гидродинамические параметры вмещающих и сопредельных водоносных комплексов с высокой степенью достоверности и обоснованности возможно получить лишь по результатам кустовых ОФР [5,6]. Несопоставимость результатов кустовых и одиночных опробований в первую очередь объясняется тем, что результаты одиночных откачек противоречивы ввиду невозможности корректно обосновать фильтрационную схему из-за недостаточности исходных данных и наложения таких технических факторов, как нарушение структуры пород в точке сооружения скважины, её емкость и диаметр, производительность насосного оборудования и т.п.

«Ущербность» одиночных ОФР можно объяснить принципиальной методологической проблемой опыта — совмещение точек наблюдения с точкой возмущения [7]. Кустовые откачки лишены большинства перечисленных выше недостатков и при учете природных и технических факторов позволяют получить достоверную информацию для прогнозных расчетов [8, 9].

Изменение рыночной конъюнктуры драгоценных металлов и металлов платиновой группы в последние годы привело к заметному увеличению геологоразведочных работ на данных

месторождениях и, соответственно, к росту объемов гидрогеологических исследований.

К сожалению, в ходе изыскательских работ остается (и усиливается) формальный подход к опытно-фильтрационным работам как части инженерно-геологических изысканий. Недропользователь для оптимизации финансовых затрат старается сократить виды и объемы дорогостоящих работ, к числу которых относятся и ОФР.

Численность откачек даже на крупный объект со сложными гидрогеологическими условиями составляет 3—4 опыта, при этом в их числе проектируется не более одной кустовой откачки, причем с единственной наблюдательной скважиной. В большинстве случаев недропользователь, независимо от стадии работ, предпочитает ограничиться одиночными откачками, что позволяет существующая нормативная база. Так, для объектов капитального строительства виды и объемы гидрогеологических работ определяются СП 446.1325800.2019 [10], где указано, что «для каждого водоносного горизонта следует выполнять не менее двух опытных кустовых откачек (наливов) при линейных размерах участка строительства более 100 м. При меньших размерах участка оборудуют один куст с проведением двух откачек (наливов) из разных скважин. В дополнение к кустовому опробованию неоднородных горизонтов допускается проводить одиночные откачки (наливы)».

На текущий момент правовой статус горных выработок непосредственно как объектов капитального строительства однозначно не определен, что в большинстве случаев позволяет отнести их к объектам эксплуатации, деятельность которых связана с пользованием недрами. Данная неопределенность не позволяет напрямую применять положения СП 446.1325800.2019 в части видов и объемов гидрогеологических исследований в составе инженерно-геологических работ при проектировании горных выработок. Что в итоге приводит к «секвестированию» гидрогеологических исследований и получению ограниченных и непредставительных исходных данных, на основании которых делается прогноз водопритоков и соответственно дренажного оборудования.

Далее следует ряд примеров, показывающих, к чему может приводить данное подчиненное положение гидрогеологических исследований.

Результаты и обсуждение

В соответствии с целевым назначением на одном из месторождений рудного золота в Свердловской области (в районе Первомайско-Верхотурской площади) проводились разведочные работы с целью уточнения геологического строения, технологических свойств, горнотехнических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий разработки данного месторождения.

Согласно минерагеническому районированию, район работ входит в состав Первомайско-Верхотурской площади (Берёзовский золоторудный район) и охватывает Первомайско-Зверевский золоторудный узел. Первомайско-Зверевский рудный узел располагается в западной части Первомайского ультрабазитового массива и контролируется тектонически ослабленной зоной субмеридиональной ориентировки, в пределах которой последовательно внедрились многочисленные дайки и малые интрузии гранитоидов зверевского и верхисетского комплексов. Гранитоиды перечисленных комплексов, как и вмещающие их ультрабазиты первомайского комплекса,

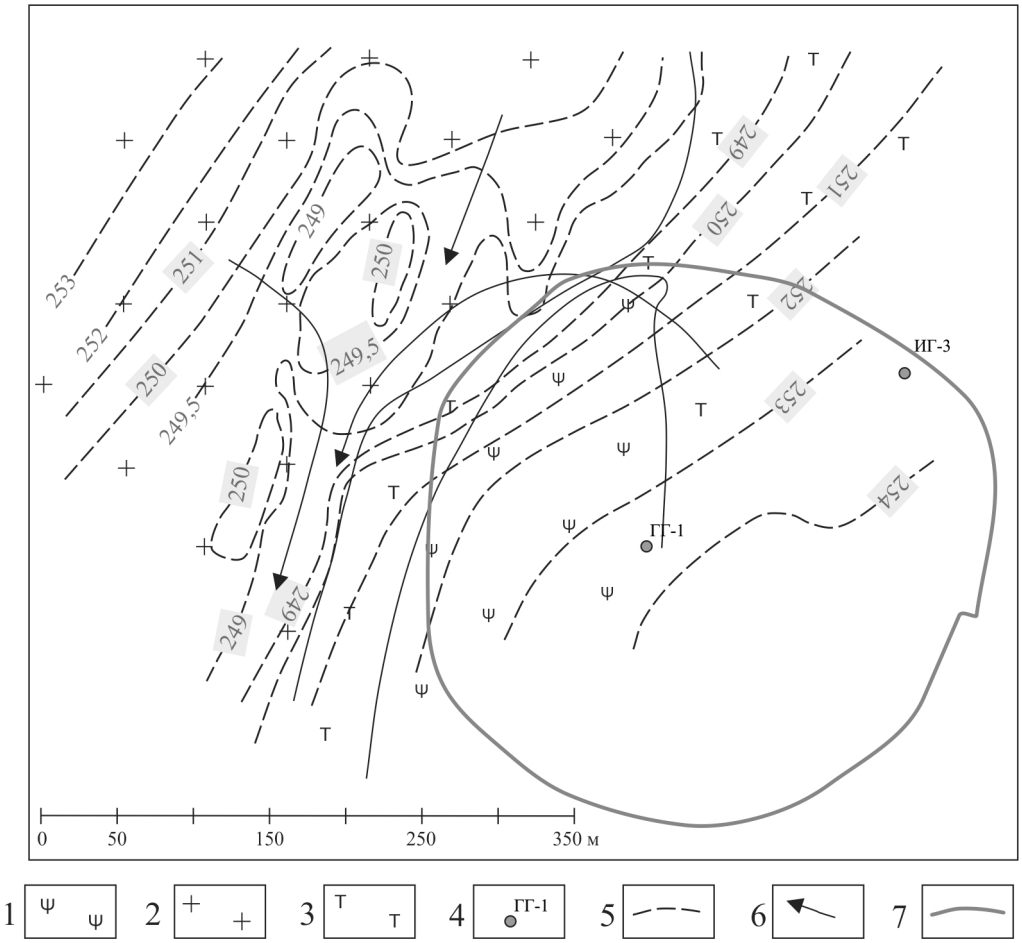

Рис. 1. Гидрогеологическая схема месторождения: 1 — водоносная зона серпентинитов первомайского комплекса; *2* — водоносная зона гранитоидов верхисетского комплекса; *3* — водоносная зона тальк-карбонатных пород первомайского комплекса; *4* — скважина гидрогеологическая; *5* — гидроизогипсы, УПВ в абс. отм.; *6* — направление движения подземных вод; *7* — контур карьера

Fig. 1 Hydrogeological scheme of the deposit: 1 — aquiferous zone of Pervomaisky complex serpentinites; *2* — aquiferous zone of Verkhisetsky complex granitoids; *3* — aquiferous zone of Pervomaisky complex talc-carbonate rocks; *4* — hydrogeological well; *5* — hydroisohypses; *6* — the direction of underground water movement; *7* — the contour of the quarry

изменены наложенными процессами березитизации-лиственитизации, сопровождаемыми золотым оруденением золото-сульфидно-кварцевой формации. Все месторождения района относятся к золото-сульфидно-кварцевой рудной формации и представляют собой одиночные или серии кварцевых жил, залегающих в березитизированных гранитоидах, тальк-карбонатных породах и серпентинитах или же в вулканогенно-осадочных породах среднего девона.

Участок работ относится к месторождениям в массивах вулканогенно-осадочных, метаморфических и лити-

фицированных осадочных (скальных и полускальных) пород, прорванных магматическими телами, молодых и древних горно-складчатых областей с трещинными, трещинно-пластовыми и жильными водами. По сложности гидрогеологических условий разработки открытым способом участок был отнесен к II группе — сложные.

В первой половине XX века на всех месторождениях района велась отработка кварцевых жил до глубины 20—60 м, до появления обильного притока грунтовых вод, когда разработка прекращалась.

При гидрогеологическом картировании масштаба 1:200 000 [11] в пределах территории Первомайско-Верхотурской золоторудной площади была выделена Первомайская субмеридиональная зона с повышенной водообильностью, связанная пространственно с тектоническим контактом гранитоидов с серпентинитами Первомайского габбро-перидотитового массива. Данная зона отчетливо выражается по результатам последующих исследований в виде локальной меридионально вытянутой депрессионной воронки (рис. 1). Депрессия замкнута на севере и открыта к югу.

Несмотря на сложные гидрогеологические условия, за весь период изысканий опытно-фильтрационные работы на месторождении включали в себя ограниченный комплекс исследований.

Для обоснования возможности подземного выщелачивания руд в коре выветривания проведены две кратковременные кустовые откачки (2010 г.) на глубину исследований 20—25 метров. В каждом кусте сооружалось только по одной наблюдательной скважине. По результатам данных ОФР получен коэффициент водопроводимости 29 м^2/сут ($k_ф$ ≈1,4 м/сут).

В дальнейшем (2017 г.) для обеспечения проекта добычи карьером до глубины 80 метров в центре проектной выработки пройдена гидрогеологическая скважина ГГ-1 (рис. 1). По результатам одиночной откачки получен коэффициент водопроводимости 55 м^2/сут ($k_ф$ ≈1,4 м/сут). В 2020 г., для уточнения параметров, дополнительно пройдена и опробована в борту проектного карьера скважина ИГ-3 (гл. 85 м). По результатам ОФР коэффициент водопроводимости составил 20 м^2/сут ($k_ф$ ≈0,5 м/сут).

По результатам данных гидрогеологических исследований был составлен прогноз водопритока в карьер на момент полного разворота работ.

Прогнозный водоприток определялся через решение прогнозной задачи для однородного по фильтрационным свойствам и неограниченного по площади безнапорного водоносного горизонта аналитическим методом по схеме «большого колодца» по формуле:

$$Q_{пр} = \frac{1{,}366 \cdot k_ф \cdot (2m - S) \cdot S}{\lg\lg(R + r_0) - \lg r_0}, \quad (1)$$

где $Q_{пр}$ — прогнозный водопритоки, м^3/сут; $k_ф$ — коэффициент фильтрации, принимался по результатам ОФР — 1,4 м/сут; m — мощность водоносного горизонта, 85 м; S — величина необходимой срезки уровня, 85 м; R — радиус влияния карьера, 1229 м; r_0 — 300 м.

Прогнозный водоприток в карьерную выемку непосредственно за счет подземных вод составил ≈ 330 м^3/час (~8000 м^3/сут). За счет дождевых вод приток увеличивается на 30 м^3/час. Суммарно за счет подземных и дождевых вод приток прогнозировался не более 360—370 м^3/час (или 8700—8900 м^3/сут). На основании данных величин были запроектированы дренажные мероприятия.

В начале 2020 года началась опытно-промышленная отработка месторождения. Водоприток в карьер появился после углубления ниже статического уровня, а после вскрытия контакта гранитоидов и серпентинитов (см. рис. 1) и углубления карьера ниже 25 м водоприток резко увеличился, что привело к приостановке работ и подключению дополнительного дренажного оборудования.

В октябре 2020 года на магистрали водоотвода был установлен расходометр-счетчик, который показал среднее значение объема откачиваемых дренажных вод 11676 м^3/сут (486 м^3/час) при глубине отработки 30 метров. Результаты дальнейшего водопритока в карьере приведены в табл. 1.

За период наблюдений средний водоприток в карьер составляет 14850 м^3/сут, что почти в два раза превышает прогнозный. Исходя из реальных водопритоков, решением обратной задачи рассчитан действующий коэффициент фильтрации. Коэффициент определен подбором (табл. 2) с использованием программного комплекса ANSDIMAT (блок ANSPIT), с реализацией схемы безнапорного пласта и параметрами карьера на момент расчета [12]:

$$Q = \pi k \frac{(2m - s_o)s_o}{\ln R_{inv} - \ln r_o}. \qquad (2)$$

Из табл. 2 видно, что действующий (реальный) коэффициент фильтрации в два раза превышает используемый в прогнозе и полученный по результатам одиночных и непредставительных кустовых откачек.

Известно [7, 13], что только кустовые опытные откачки (с достаточным количеством наблюдательных скважин) позволяют оценивать граничные условия водоносных пластов и получать все гидрогеологические параметры с наиболее высокой достоверностью.

Представляется, что при предварительном учете известной гидрогеологической обстановки (контактовой зоны с повышенной водообильностью) и квалифицированного проектирова-

Таблица 1
Водопритоки в карьер по месяцам
Water flows to the quarry by month

Месяц	Q, м^3/сут
Июль 2020	9638,9
Октябрь 2020	11676,0
Ноябрь 2020	11360,9
Декабрь 2020	Нет отработки
Январь 2021	11461,8
Февраль 2021	12430,6
Март 2021	12902,3
Апрель 2021	Затопление карьера
Май 2021	18654,6
Июнь 2021	17466,7
Июль 2021	19989,5
Август 2021	17698,54

Таблица 2
Расчет коэффициента фильтрации
Calculation of the hydraulic conductivity

Параметр	Значение
Коэффициент фильтрации $k_ф$, м/сут	2,9
Начальная обводненная мощность безнапорного пласта m, м	70,0
Величина инфильтрационного питания ε, м/сут	0,036
Радиус влияния R_{inv}, м	542,0
Площадь карьера F, м^2	95900
Приведенный радиус карьера r_0, м	175,0
Понижение в карьере S_0, м	46,0
Приток в карьер Q, м^3/сут	19989,5

ния опытно-фильтрационных работ в виде кустовой откачки с минимум тремя наблюдательными скважинами на луче по результатам ОФР было бы выявлено влияние граничных условий и получены реальные параметры проницаемости.

В итоге минимизация вида и объема опытных гидрогеологических исследований привела к заметному удорожанию горных работ за счет простоев при затоплении карьера, увеличению количества дренажного оборудования и изменению объемов нормативно допустимых сбросов.

Ограничение видов и объемов гидрогеологических исследований также может повлиять на обоснование фильтрационной схемы для определения фильтрационных параметров по результатам ОФР и, как следствие, на принятие проектных решений в части осушения горной выработки.

Рассматриваемое в данном примере месторождение благородных металлов расположено в Западно-Карельской структурно-формационной зоне Карельского кратона, локализуясь в приподошвенной части габбродолеритового интрузива протерозойского возраста. Интрузив прорывает разновозрастные архейские гранитоидные комплексы и вулканогенно-осадочные толщи Ялонвара-Хатту-Лендерского зеленокаменного пояса.

Гидрогеологический разрез месторождения достаточно простой. В верхней части разреза залегает водоносный горизонт ледниковых верхнечетвертичных отложений (glQ_{III}) мощностью 10 — 20 метров. Ниже вскрывается водоносная зона трещиноватости интрузивных пород от кислого до ультраосновного состава с опробованной мощностью до 100 метров. Подземные воды напорные, с установлением статического уровня на устье или выше.

Протяженность месторождения составляет около трех километров при средней ширине 250 — 300 метров. Согласно проекту опытно-фильтрационные работы (ОФР) были проведены только в виде трех одиночных откачек и двух «ограниченных» кустовых. Кустовые откачки проведены как на горизонт ледниковых отложений (одна опытная и одна наблюдательная скважины), так и на водоносный комплекс трещинных и трещинно-жильных вод архей-протерозойских пород (также с одной опытной и одной наблюдательной скважиной).

Результаты ОФР проинтерпретированы с получением фильтрационных параметров водоносных комплексов для дальнейшего использования в про-

гнозных расчетах водопритоков в проектируемые карьеры.

Для обработки данных были применены программные продукты интерпретации гидрогеологических испытаний скважин: ANSDIMAT+ (Institute of Environmental Geology RAS) и AquiferTest (Waterloo Hydrogeologic, Canada).

Данные программы основаны на табуляции аналитических решений для широкого ряда фильтрационных схем [13,14]. Работа с программами использует стандартную методологию, которая включает два главных этапа: идентификация модели и идентификация параметров.

Этап идентификации модели соответствует выбору концептуальной модели для выбора расчетной схемы [15]. В последнее время для идентификации расчетной модели кроме экспертного анализа кривой зависимости понижения от логарифма времени широко применяется диагностика графика изменения скорости понижений за равные промежутки логарифма времени ds/dlnt от lgt — дериватив (logarithmic derivative). Дериватив анализ более чувствителен к незначительным изменениям уровней при понижении, чем график S от lgt, и отображает характерные особенности изменения уровней, зависящие от структуры потока и гидрогеологических условий в точке опробования. Анализ логарифмической производной (дериватив анализ) является стандартом в нефтяной промышленности после работ Bourdet и др. [16].

На втором этапе, после схематизации гидрогеологических условий и выбора аналитического решения, автоматически решается задача идентификации фильтрационных параметров регрессионным анализом в сочетании с вычислением доверительных интервалов [12].

Первый этап наиболее ответственен, так как без соответствующей квалификации, тем более по одиночной откачке, крайне сложно обосновать расчетную схему, наиболее соответствующую природной. Обработка результатов ОФР — крайне нетривиальная задача [14, 17]. В первую очередь это объясняется тем, что аналитические решения для различных фильтрационных схем при интерпретации одиночного опыта всегда дают многовариантный набор искомых величин [18, 19]. То есть различные фильтрационные схемы могут быть описаны идентичными эталонными кривыми, так как неединственность интерпретации является неотъемлемым свойством обратных задач, которые обычно являются некорректными [20].

Поясним данное положение на примере результатов обработки ОФР описанного выше месторождения. По результатам опыта на одной из одиночных скважин на первом этапе обработки была принята схема с перетеканием и, соответственно, проведена идентификация фильтрационных параметров (рис. 2). Использовалось решение Хантуша–Якоба для пластов с перетеканием [21].

Из графика видно, что эталонные кривые достаточно близко совпадают с замеренными значениями. Для данной фильтрационной схемы коэффициент водопроводимости составил 1,5 м^2/сут. По аналогичной схеме были обработаны все одиночные опыты, в том числе и центральная скважина куста на архей-протерозойские породы, с получением близких параметров водопроводимости. Полученные невысокие значения коэффициента водопроводимости не соответствовали фильтрационным параметрам аналогичного месторождения, расположенного рядом в схожих гидрогеологических условиях

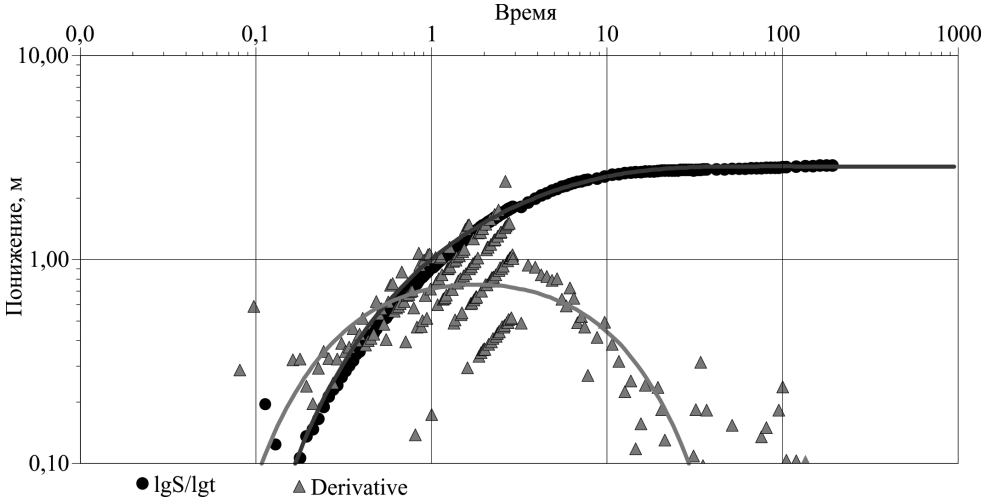

Рис. 2 График понижения по одиночной скважине с учетом перетекания
Fig. 2. Drawdown in the single-well pumping test with leakage factor and its first derivative

и опробованного большим количеством кустовых откачек.

По результатам дополнительной идентификации модели было признано несоответствие выбранной схемы с перетеканием природным условиям. При дальнейшем квалифицированном рассмотрении имеющихся исходных гидрогеологических данных наиболее адекватно описывающей природную гидродинамическую модель схемой выбрано аналитическое решение с учетом скин-эффекта (рис. 3). Для получения параметров применено решение Агарвала [22]. В основе решения — сопоставление логарифмической кривой безразмерного давления (P_{WD}) с безразмерным временем (t_D) для анализа данных об уровне в скважине, в которой преобладают емкость скважины и скин-эффект. Кривые различных типов дифференцируются с использованием коэффициента скин-эффекта (SF).

Из графика видно, что для принятой схемы совпадение эталонных кривых с экспериментальными данными также близко, но деривативная кривая более соответствует диагностической для выбранной расчетной схемой (скин-эффект).

Для приведенной расчетной схемы коэффициент водопроводимости составляет 14,9 м^2/сут и на порядок выше рассчитанного по схеме с перетеканием. Такой же порядок водопроводимости получен при расчетах с учетом скин-эффекта и для других скважин.

Нетрудно увидеть, что при использовании заниженного коэффициента водопроводимости, полученного на первом этапе интерпретации для прогнозных расчетов водопритоков в горные выработки, были бы получены заниженные значения. Это привело бы к принятию неверных проектных решений и как минимум к дополнительным финансовым затратам, значительно превышающим стоимость полномасштабной кустовой откачки с достаточным количеством наблюдательных скважин. А при неблагоприятных условиях — и к катастрофическим последствиям.

Выводы

Опытно-фильтрационные работы являются основным инструментом

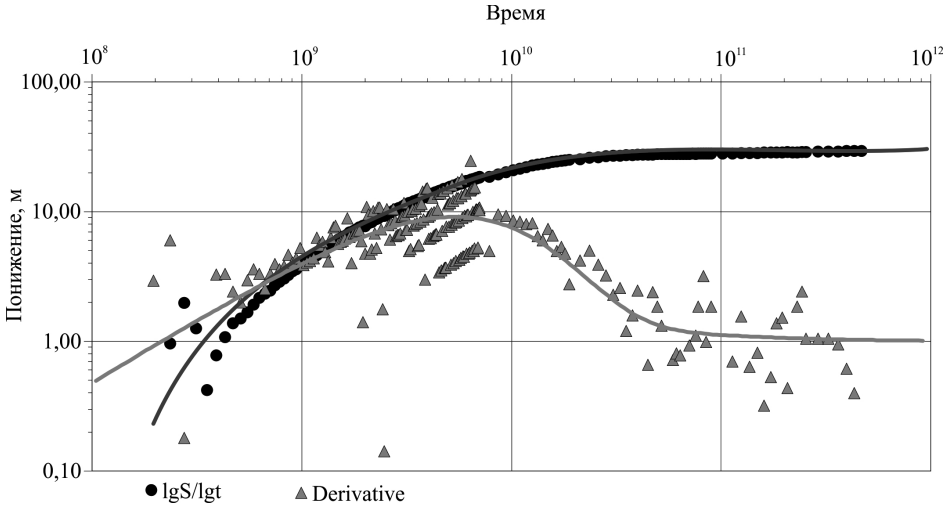

Рис. 3. График понижения по одиночной скважине с учетом скин-эффекта
Fig. 3. Drawdown in the single-well pumping test with wellbore skin and its first derivative

для получения гидрогеологических параметров вмещающих пород месторождения полезных ископаемых, на основании которых разрабатываются проектные прогнозы водопритоков при отработке.

Достоверные фильтрационные параметры могут быть получены только по результатам кустовых откачек, при этом количество наблюдательных скважин должно быть не менее двух-трех на одном луче для уверенной идентификации природной гидрогеологической модели. Одиночные откачки могут рассматриваться как дополнительные и только для получения ориентировочных величин коэффициента водопроводимости в целях проектирования дальнейших гидрогеологических исследований [23].

Использование неоднозначных результатов одиночных опытно-фильтрационных работ приводит к получению недостоверных прогнозных расчетов при проектировании дренажных мероприятий и как следствие — к негативным технологическим и финансовым последствиям.

Также нельзя согласиться с бытующим у некоторых недропользователей представлением, что компьютерные программы позволяют корректно обработать результаты одиночных ОФР и компенсировать недостаток и неоднозначность исходной информации получением достаточных для прогнозных параметров данных. Необходимо понимание, что компьютерные методы направлены только на облегчение интерпретации, а для качественного анализа всегда потребуется знающий и опытный аналитик, так как слишком часто стандартные методы интерпретации используются неправильно [12, 24, 25].

Компьютерные программы — это инструмент, а не «рецепты кулинарной книги» [14], и даже при дальнейшей трансформации программ в экспертные системы последнее слово останется за специалистом, который, основываясь на теории гидравлики скважин, может обосновать фильтрационную схему и рассчитать достоверные прогнозные параметры.

При отсутствии венчурных фондов, финансирование геологоразведоч-

ных работ полностью лежит на компаниях-недропользователях, что приводит к понятному желанию минимизировать затраты, в том числе и за счет видов и объемов дорогостоящих опытно-фильтрационных работ. В итоге кустовые откачки заменяются одиночными, а количество одиночных сокращается до минимального, позволяющего не получить достоверные данные, а формально соответствовать нормативным требованиям для прохождения экспертизы. В большинстве случаев гидрогеологические исследования пытаются совместить с геологоразведочными и инженерно-геологическими скважинами, что еще сильнее искажает результаты опробования (малые диаметры, технология бурения, наклон ствола и т.д.).

Такому положению гидрогеологических работ в составе геологоразведочных способствует и несогласованность нормативно-правовой базы, когда в капитальном строительстве кустовые откачки обязательны, а для горных выработок используются общие фразы: «гидрогеологическая информация должна обеспечивать надежность расчета». А после введения в действие дополнений к Постановлению правительства РФ № 1816 от 12.11.2020 данное несоответствие еще более обострилось (объекты горных работ, не имеющие несущих строительных конструкций, выведены из капитального строительства). Что может привести к дальнейшему снижению качества гидрогеологического обоснования прогнозных водопритоков в горные выработки и, как следствие, к негативным последствиям при разработке месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дашко Р. Э.*, *Романов И. С.* Мерзлотно-гидрогеологический фактор при анализе и оценке устойчивости выработок и безопасности ведения горных работ на золото-серебряном месторождении «Купол» (ЧАО, Анадырский р-н) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2020. — №4. — С. 21—28. DOI: 10.31857/S0869780920040037.
2. «Об утверждении требований к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по подсчету запасов твердых полезных ископаемых». Приказ от 23 мая 2011 года № 378. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.
3. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых (кроме углей и горючих сланцев). ФГУ ГКЗ. –М., 2007.
4. *Козырев В. И.*, *Бешенцев В. А.* Особенности выполнения опытно-фильтрационных работ на участках недр, эксплуатируемых одиночными водозаборами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2021. — № 6. — с. 46—56. https://doi.org/10.31660/0445—0108—2021—6—46—56.
5. *Шестаков В. М.*, *Башкатов Д. Н.* Опытно-фильтрационные работы. — М.: Недра, 1974. — 204 с.
6. *Шестаков В. М.*, *Невечеря И. К.*, *Авилина И. В.* Методы расчетов опытных откачек в водоносных пластах с перетеканием. — М.: Научный мир, 2011. — 144 с.
7. *Лехов М. В.* 2021. Опытные откачки в изысканиях: неопределенность и неоднозначность / Полевые и лабораторные методы исследования грунтов — проблемы и решения. Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки. — М., 2021. — С. 103—108.

8. *Zech A.*, *Arnold S.*, *Schneider C.*, and *Attinger S.* (2015). Estimating parameters of aquifer heterogeneity using pumping tests — Implications for field applications // Adv. Water Resour., 83, 137– 147, doi:10.1016/j.advwatres.2015.05.021.

9. Armin Pechstein, *Nadim K.* Copty, Interpretation of Pumping Tests in Heterogeneous Aquifers with Constant Head Boundary, Groundwater, 10.1111/gwat.13072, 59, 4, pp. 517 — 523, 2021.

10. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.

11. *Герасименко Б. Н.* Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:200 000 листа О-41-XXV (Свердловск). Отчет Пышминского отряда съемочной партии по результатам работ 1967 — 1969 гг. — Свердловск, 1972.

12. *Синдаловский Л. Н.* Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. — СПб.: Наука, 2021. — 891 с.

13. Osborne *Paul S.* Suggested Operating procedures for aquifer pumping tests. EPA Groundwater Issue. EPA/540/S-93/503, 1993.

14. *Renard P.* The future of hydraulic tests// Hydrogeology Journal. 2005, no 13, pp. 259 — 262. DOI: 10.1007/s10040 — 004 — 0406 — 5.

15. *Ferris J. G.*, *Knowless D. B.*, *Brown R. H.*, *Stallman R. W.*. Theory of aquifer tests. U. S. Geological Survey, Water Supply Paper. 1962,1536E, 174 p. https://doi.org/10.3133/wsp1536E.

16. Bourdet D, *Whittle T. M.*, *Douglas A. A.*, *Pirard Y. M.* A new set of type curves simplifies well test analysis // World Oil. 1983, pp. 95 — 106.

17. Kerang Sun. Formulating surrogate pumping test data sets to assess aquifer hydraulic conductivity // Journal of Hydrology X. 2018, vol. 1. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.

18. Alraune Zech, Sebastian Müller, Juliane Mai, Falk Heße, Sabine Attinger, Extending Theis' solution: Using transient pumping tests to estimate parameters of aquifer heterogeneity // Water Resources Research, 10.1002/2015WR018509. 2016, vol. 52, no. 8, pp. 6156 — 6170.

19. Pechstein, Armin & Attinger, Sabine & Krieg, Ronald & Copty, Nadim. (2016). Estimating transmissivity from single-well pumping tests in heterogeneous aquifers // Water Resources Research. 52. n/a-n/a. 10.1002/2015WR017845.

20. *Hadamard J.* Théorie des équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques et du problème de Cauchy. Acta Math. 31 333 — 380, 1908. https://doi.org/10.1007/BF02415449.

21. *Hantush M. S.* and C. E. Jacob. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer// Am. Geophys. Union Trans. 1955, vol. 36, pp. 95 — 100.

22. *Agarwal R. G.* An investigation of wellbore storage and skin effects in unsteady liquid flow: I. Analystical treatment// Society of Petroleum Engineers Journal. 1970, vol. 10, is. 03, pp. 279 — 290. https://doi.org/10.2118/2466-PA.

23. *Лехов М. В.* Определение фильтрационных параметров одиночными откачками // Инженерная геология. 2020. № 2. С. 36 — 48.

24. *Bruce D.* Misstear. The value of simple equilibrium approximations for analysing pumping test data// Hydrogeology Journal. 2001, no. 9, pp. 125 — 126.

25. *Renard P.*, *Glenz D.* and M. Mejias. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation// Hydrogeology Journal. 2009, vol. 17, pp. 589 — 600. Doi:10.1007/s10040 — 008 — 0392 — 0. https://doi.org/10.1007/s100400100133 ГИАБ

REFERENCES

1. Dashkoa R. Je., Romanov I. S. Geocryological and hydrogeological factor in the analysis and assessment of mine workings stability and mining operations safety at kupol

gold and silver deposit (CHAO, Anadyr region). *Geoekologiya. Inzheneraya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020. no 4. pp. 21—28. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0869780920040037.

2. «*Ob utverzhdenii trebovanij k sostavu i pravilam oformlenija predstavljaemyh na gosudarstvennuju jekspertizu materialov po podschetu zapasov tverdyh poleznyh iskopaemyh*». *Prikaz ot 23 maja 2011 goda no. 378*. [On approval of the requirements for the composition and rules of registration of materials submitted for state expertise on the calculation of reserves of solid minerals]. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Moscow, 2011. [In Russ].

3. *Metodicheskie rekomendacii po tehniko-jekonomicheskomu obosnovaniju kondicij dlja podscheta zapasov mestorozhdenij tverdyh poleznyh iskopaemyh (krome uglej i gorjuchih slancev)* [Methodological recommendations on the feasibility study of conditions for calculating the reserves of solid mineral deposits (except coal and oil shale)]. State Commission on Mineral Reserves Moscow, 2007. 49 p. [In Russ].

4. Kozirev V. I., Beshentsev V. A. Peculiarities of performance of experimental filtering works in sites subsoil operated by single water intakes. Oil and Gas Studies. 2021;(6):46—56. https:. doi.org/10.31660/0445-0108-2021-6-46-56 [In Russ].

5. Shestakov V. M., Bashkatov D. N. *Opytno-fil'tracionnye raboty* [Aquifer test], Moscow, Nedra, 1974, 204 p. [In Russ].

6. Shestakov V. M., Nevecherja I. K., Avilina I. V. *Metody raschetov opytnyh otkachek v vodonosnyh plastah s peretekaniem*. [Calculation methods for pumping test in a leaky aquifer]. Moscow, Nauchnyj mir, 2011, 144 p. [In Russ].

7. Lehov M. V. Opytnye otkachki v izyskanijah: neopredelennost' i neodnoznachnost' [Uncertainty and ambiguity of pumping test], *Polevye i laboratornye metody issledovanija gruntov problemy i reshenija. Materialy Obshherossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii i vystavki*. Moscow, 2021, pp. 103—108. [In Russ].

8. Zech, A., Arnold S., Schneider C., Attinger S. (2015), Estimating parameters of aquifer heterogeneity using pumping tests— Implications for field applications, Adv. Water Resour., 83, 137– 147, doi:10.1016/j.advwatres.2015.05.021.

9. Armin Pechstein, Nadim K. Copty, Interpretation of Pumping Tests in Heterogeneous Aquifers with Constant Head Boundary, Groundwater, 10.1111/gwat.13072, 59, 4, pp. 517—523, 2021.

10. *Inzhenerno-geologicheskie izyskanija dlja stroitel'stva. Obshhie pravila proizvodstva rabot. SP 446.1325800.2019* [Engineering geological survey for construction. General regulations for execution of work]. Moscow, Standartinform, 2019. 82 p. [In Russ].

11. Gerasimenko B. N. Gidrogeologicheskaja karta SSSR masshtaba 1:200 000 lista O-41-XXV (Sverdlovsk). Otchet Pyshminskogo otrjada s#emochnoj partii po rezul'tatam rabot 1967—1969. Sverdlovsk, 1972.

12. Sindalovskij L. N. *Hydrogeological calculations using the ANSDIMAT program*. St. Petereburg. Nauka. 2021. 891 p. [In Russ].

13. Osborne Paul S. Suggested operating procedures for aquifer pumping tests. EPA Groundwater Issue. EPA/540/S-93/503, 1993.

14. Renard P. The future of hydraulic tests. *Hydrogeology Journal*. 2005. no.13, pp. 259—262. DOI: 10.1007/s10040—004—0406—5

15. Ferris J. G., D. B. Knowless, R. H. Brown, and R. W. Stallman. Theory of aquifer tests. U. S. Geological Survey, Water-Supply Paper. 1536E, 1962.174 p.

16. Bourdet D, Whittle T. M., Douglas A. A., Pirard Y. M. A new set of type curves simplifies well test analysis. *World Oil*. 1983. pp. 95—106.

17. *Kerang Sun*. Formulating surrogate pumping test data sets to assess aquifer hydraulic conductivity. *Journal of Hydrology X*. 2018. Volume 1. https:. doi.org/10.1016/j.hydroa.

18. Alraune Zech, Sebastian Müller, Juliane Mai, Falk Heße, Sabine Attinger, Extending Theis' solution: Using transient pumping tests to estimate parameters of aquifer heterogeneity, Water Resources Research, 10.1002/2015WR018509, 52, 8, (6156 — 6170), (2016).

19. Pechstein, Armin & Attinger, Sabine & Krieg, Ronald & Copty, Nadim. (2016). Estimating transmissivity from single-well pumping tests in heterogeneous aquifers. Water Resources Research. 52. n/a-n/a. 10.1002/2015WR017845.

20. Hadamard J. Théorie des équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques et du problème de Cauchy. Acta Math. 31 333 380, 1908. https:. doi.org/10.1007/BF02415449.

21. Hantush M. S. and C. E. Jacob. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geophys. Union Trans.*, 1955. vol. 36, pp. 95 — 100.

22. Agarwal, R. G. An investigation of wellbore storage and skin effects in unsteady liquid flow: I. Analystical treatment. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1970. Volume 10, Issue 03. pp. 279 — 290. https:. doi.org/10.2118/2466-PA.

23. Lehov M. V. Opredelenie fil'tracionnyh parametrov odinochnymi otkachkami [Determination of aquifer hydraulic parameters by single-well test]. *Inzhenernaja geologija.*2020. no. 2, pp. 36 — 48. [In Russ].

24. Bruce D. Misstear. The value of simple equilibrium approximations for analysing pumping test data. *Hydrogeology Journal*. 2001. no. 9. pp.125 — 126.

25. Renard P., Glenz D. and M. Mejias. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*. 2009. vol. 17, pp. 589 — 600, doi:10.1007/s10040-008-0392-0.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Юрий Константинович — канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, http://orcid.org/0000-0002-9904-2969, Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, 620016 Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия, ivanovyk@ru66.ru, ivanovuk@igg.uran.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Yu. K., Cand. Sci. (Geol. Mineral.), senior researcher of geochemistry and ore-forming laboratory, A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, ivanovyk@ru66.ru; ivanovuk@igg.uran.ru.

Получена редакцией 08.11.2021; получена после рецензии 31.03.2022; принята к печати 10.04.2022.
Received by the editors 08.11.2021; received after the review 31.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.