

УДК 53.082.2+532.546+551.491.5

ОЦЕНКА ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИННО-ПОРОВОГО КОЛЛЕКТОРА ПРИ ЭПИЗОДИЧЕСКОМ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Э.М. Горбунова, А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов, И.С. Свинцов

В статье представлены результаты обработки прецизионных измерений уровня подземных вод при стационарном и эпизодическом техногенном воздействии на водонасыщенный коллектор. На фоне регионального снижения уровня установлено формирование депрессионных мини-воронок, вызванных периодическим водоотбором подземных вод из близрасположенной скважины на территории Геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО) ИДГ РАН. Сравнительный анализ восстановления уровня в условиях постепенного дренирования зон повышенной трещиноватости пород может быть использован при оценке изменения проницаемости пласта по глубине.

Введение

Для определения фильтрационных свойств водовмещающих пород повсеместно используют стандартные методы откачки, которые имеют свои недостатки из-за сложной геометрии пласта, неоднородности разреза и наличия границ. Поэтому дополнительно для оценки проницаемости коллектора могут быть привлечены данные высокоточного мониторинга уровня подземных вод. В работе [Allegre et al., 2016] обоснована информативность приливного анализа долговременных высокоточных измерений уровня при исследовании зон разломов по сравнению с результатами обработки данных последовательно проведенных откачек. По данным мониторинга состояния трещин, выделенных по результатам геофизических исследований в центральной и наблюдательной скважинах, при проведении откачки и после, при восстановлении уровня, определены гидромеханические параметры пласта и зарегистрировано смещение бортов трещин [Burbey et al., 2012].

Исследование фазового сдвига между вариациями уровня воды в скважине и компонентами гравитационного потенциала широко используется для оценки коллекторских свойств флюидонасыщенных массивов [Cutillo, Bredehoeft, 2011; Doan et al., 2006]. Изменения амплитуды приливной волны M_2 и фазового сдвига после проведения откачки сопоставимы по значениям с изменениями этих же параметров, регистрируемых на постсейсмической стадии [Matsumoto, Roeloffs, 2003]. На представленных диаграммах в одной из наблюдательных скважин зарегистрировано искажение приливного отклика, увеличение амплитуды и уменьшение значения фазового сдвига в момент начала откачки [Allegre et al., 2016]. Подобный эффект зашумленности спектра приливного сигнала был зарегистрирован в скважине на территории ГФО «Михнево» и связан с восстановлением уровня после откачки [Виноградов и др., 2010].

В настоящей работе мы предлагаем методический подход к выделению полезной информации из гидрогеологического отклика на техногенную помеху, связанную с эпизодическим водоотбором из технической скважины, оборудованной на одновозрастный водоносный горизонт. Метод позволяет определить вертикальную анизотропию пласта при использовании высокоточных данных периодического зондирования коллектора на фоне устойчивого тренда снижения уровня. Исследований по рассмотрению техногенной помехи, связанной с влиянием удаленных откачек на уровень подземных вод в качестве зондирующего сигнала при оценке фильтрационных свойств коллектора, ранее не проводилось. Подобный метод может найти применение при эксплуатации месторождений углеводородов, водозаборных узлов и мониторинге состояния массива горных пород, вмещающих крупные инженерные сооружения.

Геолого-геофизические и гидрогеологические условия участка

Объект исследований – гидрогеологическая система «пласт-скважина» находится на территории ГФО «Михнево», расположенной на расстоянии 80 км южнее г. Москвы. По результатам бурения скважины № 3 (в которой зарегистрирован отклик на эпизодическое техногенное воздействие) геологический разрез сверху вниз представлен: отложениями среднечетвертичного возраста (gIIdn) –

суглинком плотным моренным с щебнем в интервале 0–10,8 м; породами среднего карбона (C_2).

Лопасненская (C_2lp) и нарская (C_2nr) толщи в интервалах 10,8–27,4 и 32,9–56,2 м сложены известняком неравномерно трещиноватым и кавернозным с подчиненными прослоями доломита и глины мощностью от 1,1 до 2,4 м. Хатунский и верейский горизонты в интервалах 27,4–32,9 и 56,2–60,5 м выполнены глинами [Спивак, 2015].

По данным геофизических исследований, проведенных в рассматриваемой скважине № 3 после бурения и пробной откачки, в разновозрастных отложениях прослежены закономерные изменения радиоактивности пород, зависящие от литологического состава, степени водонасыщенности и трещиноватости. Гамма-активность среднечетвертичных отложений изменяется от 10 до 12 мкР/ч, известняка – от 4 до 6 мкР/ч. На участках окремнения и трещиноватости известняка, в прослоях глин гамма-активность возрастает до 10 мкР/ч. Хатунские и верейские глины на каротажной диаграмме выделяются четким повышением гамма-активности до 20–22 мкР/ч.

Повышенная кавернозность пород приурочена к приконтактным зонам (глина-известняк) и магистральным трещинам в интервалах 43,5–43,9, 44,7–45,2 и 47,7–48,0 м. Выделенные зоны неравномерной трещиноватости пород соотносятся с интервалами поглощения промывочной жидкости и зарегистрированных «провалов» снаряда в интервалах 45,0–45,3 и 51,7–52,0 м в процессе бурения.

Режим каширского водоносного горизонта техногенно нарушен в связи с постоянной эксплуатацией рядом водозаборных скважин, расположенных как на прилегающей территории, так и на территории ГФО «Михнево». Данные многолетнего мониторинга указывают на региональный тренд снижения уровня подземных вод с мая 2014 г. от 42,7 до 46,4 м. Сезонные вариации уровня слабо выражены. Максимальный подъем уровня до 1,5 м зарегистрирован осенью 2013 г., минимальный – до 0,5 м весной 2015 г. (рис. 1).

На рис. 1 вертикальными линиями ограничены интервалы, соответствующие разной мощности обводненных пород, с учетом постепенного дренирования двух магистральных трещин из-за постепенного снижения уровня каширского водоносного горизонта. В прецизионных гидрогеологических рядах также выделяются локальные участки техногенно-нарушенного режима, представленные депрессионными мини-воронками [Свинцов и др., 2015] – эпизодическими снижениями уровня подземных вод (квадратные врезки на рисунках 1, 2).

Образование мини-воронок связано с эпизодическим водоотбором (через каждые 3–5 суток) из технической скважины, расположенной на территории ГФО «Михнево» на расстоянии 300 м от наблюдательной. Амплитуды снижения уровня при техногенном воздействии на пласт и гидрогеологического отклика на прохождение сейсмических волн от землетрясений сопоставимы. Влияние земных приливов на вариации уровня верхнего безнапорного каширского водоносного горизонта слабо выражены [Свинцов и др., 2015].

Форма мини-воронки зависит не только от технических параметров проводимой откачки (продолжительности, производительности насоса), но и от вариаций уровня под влиянием экзогенных факторов (условий питания/разгрузки, атмосферного давления). В условиях квазистационарного режима фильтрации при суточных вариациях уровня, не превышающих ± 5 см, мини-воронки подобны стан-

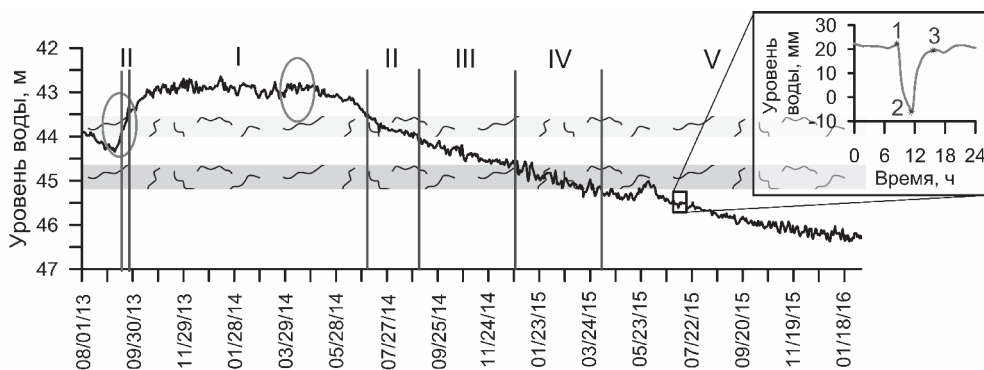


Рис. 1. Диаграмма уровня каширского водоносного горизонта.

I–V – интервалы с разной мощностью обводненных пород, м: I – 12,7–13,5, II – 12,3–12,7, III – 11,5–12,3, IV – 11,0–11,5, V – менее 11. Серые полосы соответствуют положению магистральных трещин, выделенных по результатам бурения и геофизических исследований. На квадратной врезке показан фрагмент суточной записи с мини-депрессионной воронкой (04.07.2015 г.), сформированной при откачке из технической скважины.

Арабские цифры соответствуют: 1 – началу формирования воронки, 2 – минимальному значению уровня, 3 – полному восстановлению уровня после откачки. Эллипсами показаны области, которые в увеличенном масштабе представлены на рис. 2

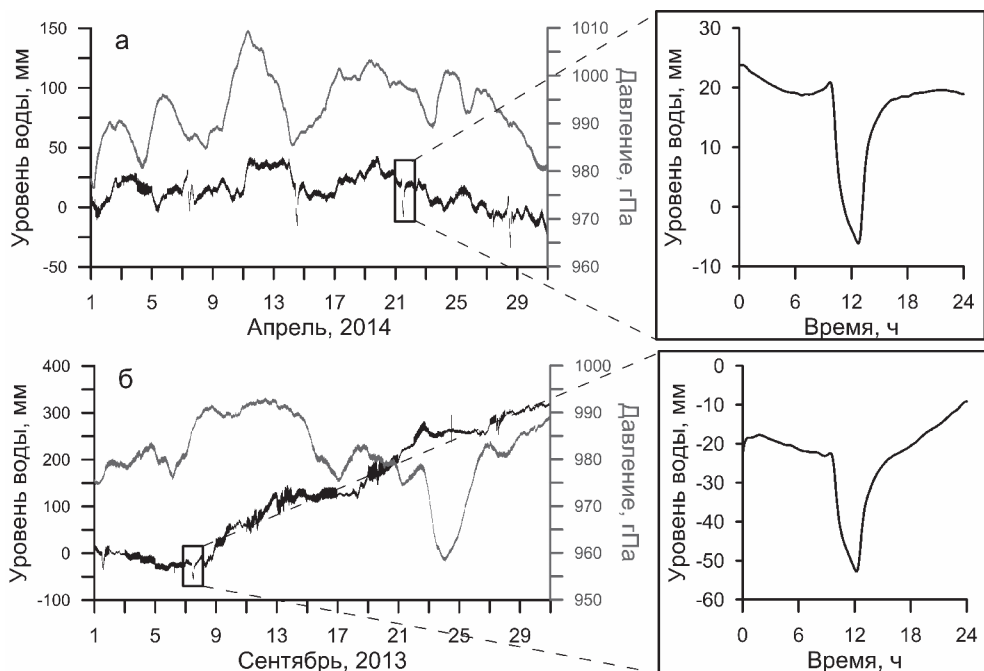


Рис. 2. Общий ход уровня, очищенный от влияния атмосферного давления (черная линия), и давления (серая) за апрель 2014 г. (а) и сентябрь 2013 г. (б). На квадратных врезках показаны мини-депрессионные воронки

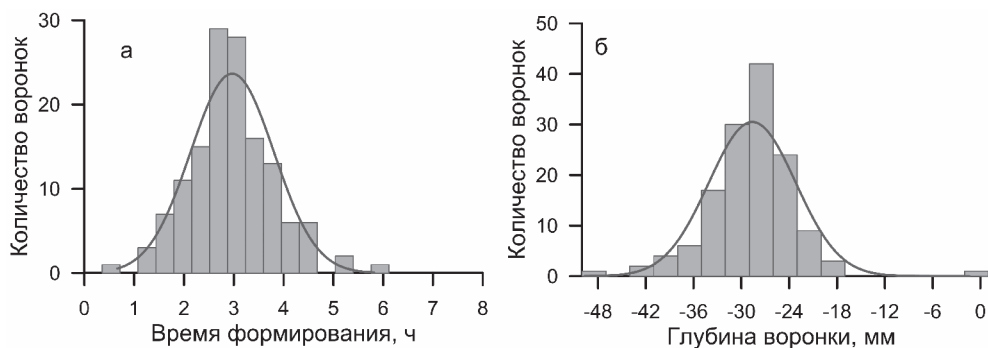


Рис. 3. Гистограммы времени формирования воронок (а) и глубины воронок (б) по всей выборке данных. Сплошная линия соответствует нормальному распределению величин с параметрами: а) $\mu = 3, \sigma = 0,8$, б) $\mu = -28,6, \sigma = 5,5$

дартным депрессионным воронкам и характеризуются практически полным восстановлением уровня до первоначального положения после остановки откачки (рис. 2, а). Напротив, при сопоставимом изменении атмосферного давления восстановление уровня после откачки осложнено из-за изменения условий питания (в осенний паводок 2013 г., рис. 1) и определение «первоначального» статического положения уровня затруднено (рис. 2, б). Поэтому выборка депрессионных мини-воронок для последующей обработки выполнена с учетом геолого-геофизических и гидрогеологических данных, полученных в процессе бурения, проведения геофизических исследований, пробных откачек и наблюдений за изменением уровня каширского водоносного горизонта.

Методика обработки данных

Исследование фильтрационных свойств коллектора проводилось по данным прецизионной регистрации уровня каширского водоносного горизонта за период наблюдений с августа 2013 по январь 2016 гг. Были отобраны 140 мини-воронок, которые сформированы при стабильной работе насоса в технической скважине. Предварительно данные уровня подземных вод были очищены от влияния атмосферного давления, далее проводилось удаление составляющих сигнала с периодами меньше 1 ч с помощью фильтра Баттерворта второго порядка.

В зависимости от длительности и режима работы насоса, а также условий питания мини-воронки различаются по времени формирования, глубине, а также разнице уровня до начала формирования мини-воронки (значение уровня в точке 1 на врезке рис. 1) и уровня после ее восстановления (значение уровня в точке 3 на врезке рис. 1). Приблизительно для 65% депрессионных мини-воронок время их формирования попадает в интервал 2,2–3,8 ч, а их глубина составляет -34...-23 мм (рис. 3). При последующем анализе отбор мини-воронок выполнялся при условии соответствия одновременно этим двум критериям, а также с учетом третьего параметра – разницы значения уровня в точке 1 и в точке 3 на рис. 1 (находится в пределах ± 10 мм). Мини-воронки с выбранным значением ± 10 мм, которое составляет треть от средней глубины воронок (~ 29 мм), привлечены для оценки фильтрационных свойств коллектора.

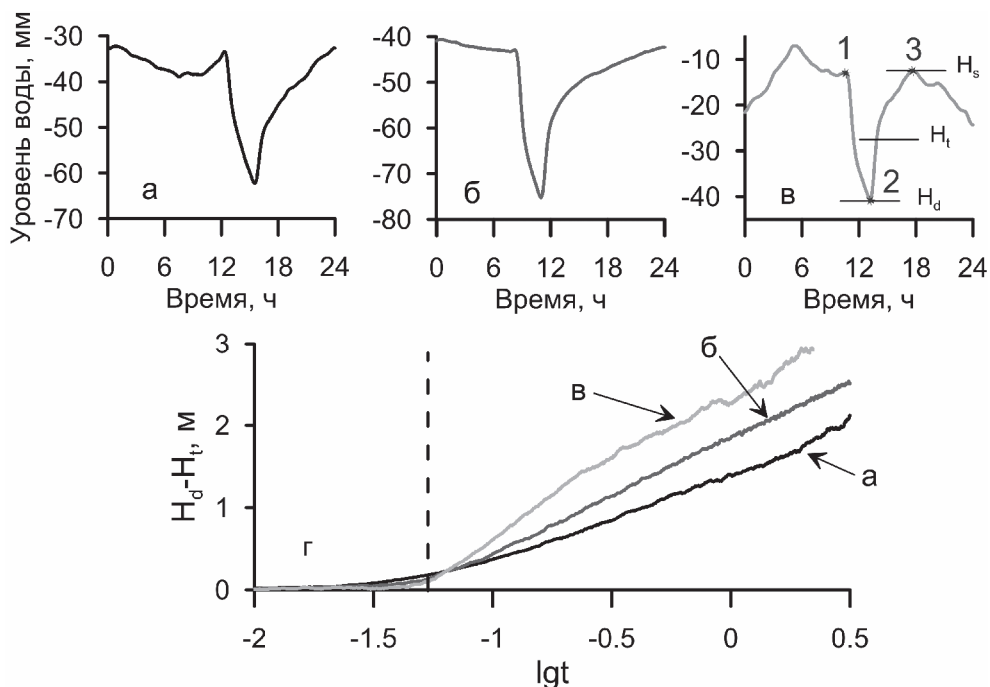


Рис. 4. Депрессионные воронки, зарегистрированные при положении общего хода уровня в зонах: I – 12.03.2014 г. (а); III – 18.10.2014 г. (б); V – 14.08.2015 г. (в). H_d (динамическое) – минимальное значение уровня при откачке в точке 2, H_s (статическое) – значение уровня после восстановления в точке 3, H_t – значение уровня во время восстановления. 1 – начало формирования воронки. График временного прослеживания (г) для воронок а–в. Изменение угла наклона графика соответствует изменению проницаемости коллектора.

Рассматривались данные справа от пунктирной линии, соответствующие притоку из пласта без влияния скин-эффекта

В выборку вошли 69 мини-воронок, зарегистрированных при разной мощности обводненных пород, которые использовались для предварительной оценки водопроводимости трещинно-порового коллектора графоаналитическим способом [Боревский и др., 1979]. Суть метода заключается в построении графика временного прослеживания восстановления уровня (изменение уровня от логарифма времени) после прекращения работы насоса в технической скважине при условии квазистационарного режима фильтрации в течение суток наблюдений (участок 2-3 на врезке рис. 1).

На графиках временного прослеживания (рис. 4, г) выделяются два основных временных участка. Первый участок (слева от пунктирной линии) характеризует изменение уровня с учетом влияния скин-эффекта (несовершенство вскрытия водоносного горизонта). По наклону второго участка (справа от пунктирной линии), который соответствует притоку из безнапорного водоносного горизонта,

рассчитана водопроводимость пласта $km = \frac{0,366Q}{c}$, где Q – объем откаченной

жидкости во время работы насоса, а c – угловой коэффициент второго участка графика временного прослеживания. Оценка проницаемости карбонатного трещинно-порового коллектора проведена с учетом изменения мощности обводненных пород.

Полученные результаты

Рассмотрены исходные данные, в которых наряду с влиянием экзогенных факторов (питание, атмосферное давление, приливы) прослеживается техногенная помеха, связанная с водоотбором из технической скважины. Эпизодическое локальное формирование мини-депресссионных воронок отмечено на фоне регионального снижения уровня, которое привело к уменьшению мощности водонасыщенных пород на 3,7 м (рис. 1). Данные по формированию мини-депресссионных воронок в различных условиях – при полном водонасыщении карбонатной толщи (зона I) и последовательного уменьшения мощности водонасыщенных пород и дренировании зон трещиноватости (зоны II–V) использованы для оценки водопроводимости трещинно-порового коллектора графоаналитическим способом.

Депрессионные мини-воронки в наблюдательной скважине имеют ассиметричную форму по снижению и восстановлению уровня. Воронки, зарегистрированные при положении уровня воды в зонах I, III и V, показаны на рис. 4, а-в. «Ветви» восстановления уровня для каждой из мини-воронок различаются и условно могут быть аппроксимированы двумя линиями, соответствующими скин-эффекту и притоку из пласта. На рис. 4, г изменение наклона графика временного прослеживания уровня справа от пунктирной линии связано с изменением мощности обводненных пород.

Отобранные мини-воронки по описанным выше критериям составили статистически значимую выборку, для которой наблюдается общий тренд на снижение проницаемости обводненной части коллектора на фоне регионального снижения уровня (рис. 5). Вариации значения проницаемости при полном восстановлении

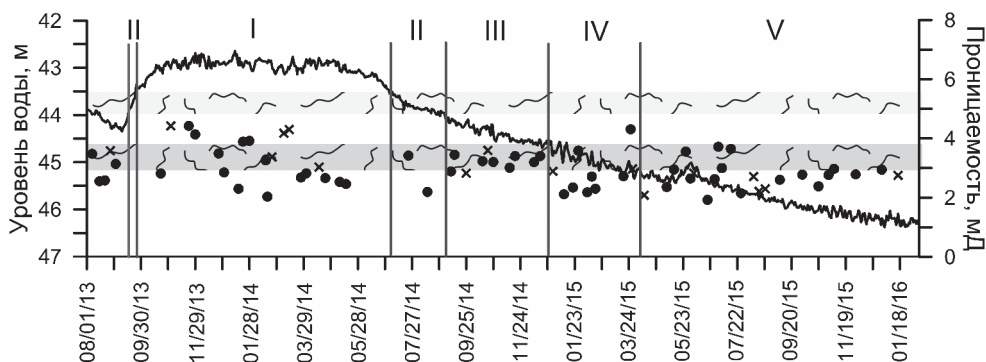


Рис. 5. Диаграмма уровня каширского водоносного горизонта.

Значками показаны значения проницаемости при изменении общей мощности водонасыщенных пород: крестики соответствуют воронкам с полностью восстановленным уровнем в пределах точности измерений, черные кружки – воронкам, для которых разница уровня до начала формирования воронок и уровня после ее восстановления лежит в интервале ± 10 мм. Римские цифры и серые полосы соответствуют описанию, приведенному на рис. 1

уровня в пределах погрешности измерений показаны черными крестиками (всего 17 мини-воронок). Величины проницаемости, рассчитанные по мини-воронкам, для которых разница уровня до начала формирования воронки и уровня после его восстановления (разница значения уровня в точке 1 и в точке 3 на рис. 4) находится в пределах ± 10 мм, показаны черными кружками. Для полностью восстановленных мини-воронок тренд снижения проницаемости по мере уменьшения обводненной мощности пласта более выражен.

Обсуждение результатов

Обработка экспериментальных материалов, полученных в период с января 2013 по январь 2016 гг., позволила оценить геолого-геофизические и гидрогеологические условия участка расположения наблюдательной скважины № 3 в пределах ГФО «Михнево». Результаты предварительного анализа техногенно-нарушенного режима подземных вод по данным прецизионного мониторинга подземных вод приведены в [Vinogradov et al., 2016]. В данной работе было продолжено исследование по оценке свойств флюидонасыщенного коллектора при эпизодическом техногенном воздействии и региональном уменьшении мощности обводненных пород (своеобразный эффект «двойной» откачки).

Средние в каждой зоне (I-V) значения проницаемости имеют тенденцию к понижению при уменьшении общей мощности обводненных пород (рис. 6). При полном водонасыщении карбонатной толщи (зона I) проницаемость пород наибольшая, поскольку "работают" все рассматриваемые зоны I-V коллектора. При постепенном снижении уровня уменьшается мощность обводненных пород и в зоне V, которая характеризуется увеличением глинизации известняка по данным гамма-каротажа скважины (рис. 6, а), зарегистрированы наименьшие значения проницаемости. Стоит отметить, что, хотя и был проведен предварительный отбор депрессионных мини-воронок по заданным трем параметрам, вариации значений проницаемости имеют широкие пределы внутри каждой зоны. Для зоны V характерны более низкие средне-квадратичные отклонения, чем для остальных зон. В силу того, что внешнее техногенное воздействие (длительность и режим

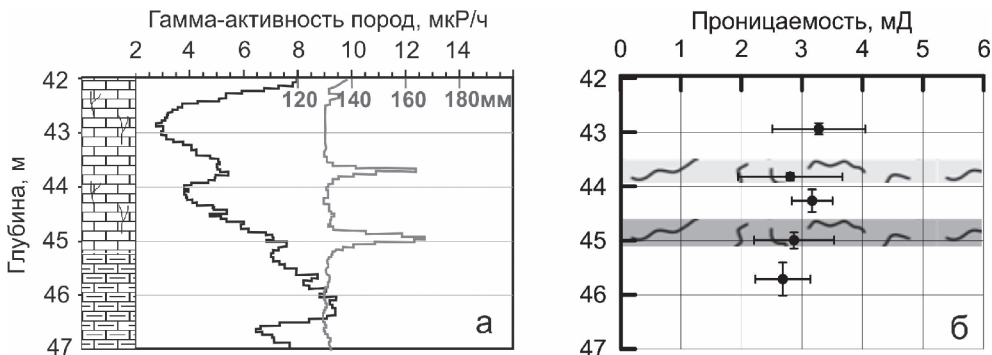


Рис. 6. Геологический разрез с данными гаммаметрии (черная линия) и кавернометрии (серая) (а) и средние по зонам I-V значения проницаемости при уменьшении общей мощности водонасыщенных пород (б). Серым показаны области трещиноватости

работы насоса) носит нестационарный характер, отбор "правильных" мини-воронок является необходимым.

Полученные средние значения изменения проницаемости коллектора по глубине составляют 2,6–3,3 мД (при общем тренде снижения уровня с 42,7 до 46,4 м) и не противоречат результатам лабораторных определений. Проницаемость отобранных образцов керна в процессе бурения скважины № 3 изменяется в широких пределах от 0,7 до 13,9 мД [Gorbunova et al., 2015]. Водопроницаемость верхнего каширского водоносного горизонта по результатам пробной откачки составила 15 м²/сут, по графикам временного прослеживания восстановления уровня при мини-откачках, изменяется в пределах от 20 до 40 м²/сут. Для аналогичного коллектора, вскрытого в интервале 766–870 м на полигоне в Неваде, составляет 9 м²/сут по данным откачки [Cutillo, Bredehoeft, 2011]. Оценка свойств коллектора, определенная разными методами по данным прецизионных наблюдений, крайне ограничена. Например, в [Allegre et al., 2016] проницаемость толщи песчаников с подчиненными прослоями алевролита и сланца, расположенной южнее зоны влияния разлома Сан-Андреас, по данным обработки откачки изменяется от 30 до 90 мД, гидрогеологического отклика на приливную волну M₂ – от 1 до 300 мД. Рассчитанные нами значения проницаемости карбонатного трещинно-порового коллектора в платформенных условиях по данным мини-откачек находятся в пределах значений, полученных по результатам обработки откачки и приливной волны M₂.

Для полной оценки фильтрационных свойств коллектора требуется накопить большую базу данных по параметрам депрессионных воронок при разных значениях обводненной мощности коллектора и более детально изучить зоны трещиноватости. Это позволит рассмотреть поинтервальное изменение фильтрационных свойств коллектора с двойной пористостью.

Заклучение

Высокоточные вариации уровня, связанные с эпизодическим водоотбором из пласта, по аналогии с данными, полученными при стандартном опробовании водоносных горизонтов, информативны для определения фильтрационных свойств коллектора. По результатам обработки данных по формированию депрессионных мини-воронок при относительно стабильных квазистационарных условиях фильтрации подземных вод, соответствующих пороупругой деформации коллектора, проницаемость коллектора составила 2,6–3,3 мД при общем тренде снижения уровня с 42,7 до 46,4 м.

Данные прецизионного мониторинга позволяют исследовать вертикальную анизотропию свойств трещинно-порового коллектора при региональном уменьшении мощности обводненных пород, тогда как по результатам обработки данных опытно-фильтрационных работ проводится оценка основных гидрогеологических параметров всего опробуемого водоносного горизонта.

Предложенный методический подход дистанционного определения проницаемости флюидонасыщенного коллектора может использоваться при изучении сложных геологических разрезов и мониторинге эффективности разработки месторождений углеводородов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00694) и Российской академии наук (проект № 0146-2015-0012).

Литература

Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.

Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Гидрогеологический отклик на изменение эффективного напряжения водовмещающих пород // Динамические процессы в геосферах: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2010. С. 88-96.

Свинцов И.С., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В. Характеристика состояния флюидонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 158-165.

Стивак А.А., Рябова С.А., Горбунова Э.М. Геомагнитные вариации на земной поверхности и их связь с динамикой подземных вод // Вестник НЯЦ РК. 2015. Вып. 4. С. 98-106.

Allegre V., Brodsky E., Xue L., Nale S.M., Parker B.L., Cherry J.A. Using earth-tide induced water pressure changes to measure in situ permeability: A comparison with long-term pumping tests // Water Resources Research. 2016. 52. DOI: 10/1002/2015WR017346.

Burbey T.J., Hisz D., Murdoch L.C., Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects // Journal of Hydrology. 2012. 414-415. P. 317-328.

Cuttillo P.A., Bredehoeft J.D. Estimating Aquifer Properties from the Water Level Response to Earth Tides // Ground Water. Vol. 49, No. 4, July-August. 2011. P. 600-610.

Doan M.L., Brodsky E.E., Priour R., Signer C. Tidal analysis of borehole pressure - A tutorial Schlumberger Research report. 2006.

Gorbunova E., Gerke K., Besedina A., Vinogradov E., Korost D., Svintsov I. Study of reservoir permeability using water level monitoring and pore-scale modelling based on X-ray microtomography scanning of the rock samples // 26th IUGG General Assembly, 22 June-2 July, 2015, Prague, Czech Republic.

Matsumoto N., Roeloffs E.A. Hydrological response to earthquakes is the Haibara well, central Japan – II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties // Geophys. J. Int. 2003. 155. P. 899-913.

Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A. Study of fractured collector state change with recurrent pumping // SGEM2016 Conference Proceedings. 2016. Book1. V. 1. P. 997-1004. DOI: 10.5593/SGEM2016/B11/S02.126.