

УДК 556.3.04+556.332+556.366

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО КОЛЛЕКТОРА ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт динамики геосфер Российской академии наук

В статье рассматриваются скачкообразные изменения уровня безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к карбонатному коллектору трещинно-порового типа, которые не связаны с техногенными помехами и градиентом атмосферного давления. Выделенные подъемы и снижения уровня с амплитудами до 28 мм приурочены преимущественно к границам зон интенсивной трещиноватости водовмещающих пород и подтверждают наличие магистральных микротрещин. Полученные данные использованы для анализа анизотропии фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора.

Введение

При дистанционном изучении фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов, в рамках пороупругой модели, основное внимание уделяется исследованию динамических вариаций уровня подземных вод с амплитудами от первых мм до десятков мм, обусловленных влиянием естественных факторов: атмосферным давлением, земными приливами, прохождением сейсмических волн [Elkhoury et al., 2006; Doan et al., 2006; Kitagawa et al., 2011; Lai et al., 2013]. Вместе с тем изменение условий питания и разгрузки подземных вод, удаленный эпизодический и стационарный водоотбор также вызывает вариации уровня подземных вод с амплитудами от десятков мм [Xue et al., 2016; Gorbunova et al., 2017] до первых метров [Allegre et al., 2016]. В частности, в условиях распространения безнапорных водоносных горизонтов региональный тренд снижения/подъема уровня приводит к нарушению гидростатического равновесия, изменению мощности обводненных пород, и, возможно, фильтрационных свойств коллектора.

Задача данной работы заключается в поиске и выделении в прецизионных гидрогеологических данных скачкообразных изменений уровня, которые подтверждают наличие водопроводящих (магистральных) трещин. Объектом исследований является карбонатный коллектор трещинно-порового типа, характеризующийся различным динамическим соотношением между осушенной и обводненной частью пород за трехлетний период стационарных наблюдений. Измерения проводятся в скважине глубиной 60 м, расположенной на территории геофизической обсерватории «Михнево» (ГФО «Михнево») ИДГ РАН, на расстоянии 80 км южнее мегаполиса – г. Москвы.

Характеристика условий формирования и режима безнапорного водоносного горизонта на территории ГФО «Михнево»

На территории ГФО «Михнево» первые от поверхности безнапорные водоносные горизонты приурочены к лопасненской (C_{2lp}) и нарской (C_{2nr}) толщам каширского горизонта среднего карбона ($C_2kš$), разделенным водоупором – хатунскими глинами (C_{2ht}) мощностью 5.5 м, которые обуславливают изолированность формирования уровней (рис. 1). Обводненная часть верхней лопасненской толщи вскрыта в интервале 25.8–27.4 м, нижней нарской толщи – в интервале 42.6–56.5 м. Водовмещающие породы представлены известняками неравномерно трещиноватыми кавернозными с подчиненными прослоями глины, мергеля. Область питания верхнего безнапорного горизонта приурочена к водораздельной части Москворецко-Окской равнины. Общее количество выпадающих атмосферных осадков определяет пополнение естественных ресурсов подземных вод следующего года за рассматриваемым периодом и амплитуду паводковой волны.

Возрастание годового количества осадков от 619 мм в 2013 г. до 1065 мм в 2015 г. обусловило увеличение максимальной амплитуды сезонного подъема уровня от 0.4–0.6 м в верхней толще до 1.6 м в нижней толще несмотря на общий тренд снижения уровня (рис. 2). Значительные вариации уровня в обводненной части нарской толщи в периоды максимальных диапазонов изменений атмосферного давления подтверждают высокую барометрическую эффективность нижнего горизонта. Режим подземных вод техногенно нарушен из-за повсеместной эксплуатации каширского горизонта, тем не менее, в вариациях уровня прослеживается годовая

Рис. 1. Схематический геолого-гидрогеологический разрез.

1 – суглинок; 2 – известняк; 3 – глина; 4 – доломит; 5 – мергель; 6 – окремнение; 7 – скважина (цифра справа – уровень подземных вод, м); косой штриховкой выделена обводненная часть верхней лопасненской толщи (C_{lp}) и нижней нарской толщи (C_{nr}) каширского горизонта ($C_{k\check{s}}$)

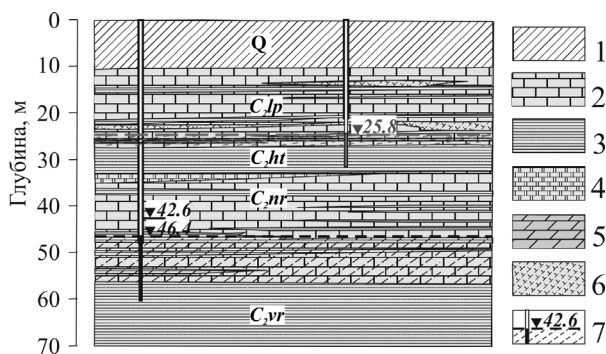
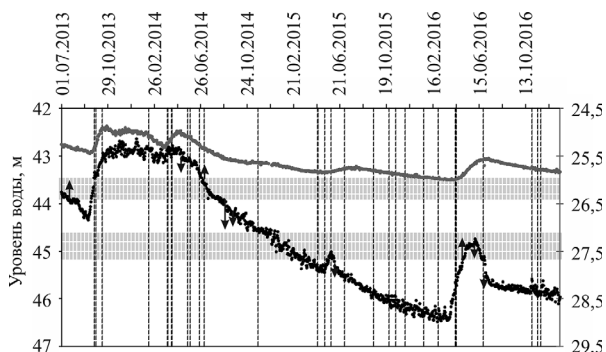


Рис. 2. Диаграммы уровня лопасненской (серая линия) и нарской толщ (черная).

Интервалы повышенной трещиноватости пород обозначены серыми полосами. Скачкообразные подъем уровня – стрелка вверх, снижение – стрелка вниз (показаны внемасштабно). Вертикальный штрих-пунктир соответствует датам удаленных землетрясений с $M_s > 6.4$



цикличность в виде интенсивного подъема уровня в паводок (весенний период). По данным мониторинга 2013–2016 гг. региональный тренд снижения уровня подземных вод составил 1.1 м в верхней обводненной толще и 3.8 м – в нижней.

Максимально низкие значения уровня в верхней части обводненной толщи устанавливаются на 10–20 суток позже по сравнению с нижней. В связи с малой мощностью обводненной части пород, не превышающей 1.6 м, лопасненская толща не информативна для постановки прецизионных измерений. Уровень обводненной части нижней нарской толщи (далее – каширский безнапорный водоносный горизонт) уменьшается от 42.6 до 46.4 м. Соотношение мощностей осушенной к обводненной части пород изменяется от 0.7 до 1.2.

В соответствии с результатами геофизических исследований, проведенных в скважине, и документации отобранного керна в зоне дренирования (осушения) пород выделено две зоны 43.5–43.9 м и 44.7–45.2 м, характеризующиеся повышенной трещиноватостью пород. В работе [Горбунова и др., 2016б] выполнена оценка проницаемости трещинно-порового коллектора при эпизодическом техногенном воздействии. В пределах этих двух интервалов за период наблюдений 2013–2016 гг. отмечена максимальная скорость снижения и восстановления уровня от 20 мм/сут.

Методика исследований

Высокоточные измерения уровня безнапорного водоносного горизонта проводятся в наблюдательной скважине глубиной 60 м, расположенной на территории ГФО «Михнево», с июля 2013 г. по настоящее время с использованием датчика

уровня LMP30i (производство Германия). Точность регистрации уровня с частотой 1 Гц составляет 1.7 мм. Ежедневно в скважине осуществляется замер уровня воды с использованием стандартного электроуровнемера ЭУ-100 с регистрацией времени замера. Погрешность ручного измерения уровня составляет ± 1 см, времени ± 1 мин.

В рамках комплексного мониторинга геофизических полей на территории ГФО «Михнево» измерения атмосферного давления выполняются цифровой метеостанцией, сейсмическая регистрация ведется малоапертурной сейсмической группой (МСГ «Михнево») [Адушкин и др., 2016]. На основе визуального просмотра прецизионных гидрогеологических рядов за период 2013–2016 гг. выделены интервалы скачкообразного изменения уровня безнапорного водоносного горизонта с амплитудами, превышающими точность измерений уровня в два и более раз. В пределах обозначенных суток для каждого из интервалов изменений уровня были построены графики исходного уровня, атмосферного давления и уровня, отфильтрованного от давления в диапазоне 1 час. Для каждого интервала установлены продолжительность, амплитуда и знак «скачка».

Для определения причин скачкообразных измерений уровня отмеченные интервалы сопоставлены с геолого-геофизическим разрезом скважины, барометрическими и сейсмическими данными, журналом регистрации техногенных помех на территории геофизической обсерватории (перебои электричества, движение большегрузного транспорта и др.). Для исключения из рассмотрения вариаций, связанных с использованием стандартного электроуровнемера, проведены контрольные измерения уровня при высоте столба воды над датчиком не более 0.5 м на протяжении 5 суток. Замер уровня слабо выделяется в виде кратковременного «всплеска» в течение 10–15 сек с амплитудой, не превышающей фоновые вариации уровня в 2 раза.

Результаты прецизионного мониторинга безнапорного водоносного горизонта

Визуальный просмотр прецизионных гидрогеологических данных за период наблюдений 2013–2016 гг., отфильтрованных от влияния атмосферного давления, позволил выделить 13 суток, в пределах которых были зарегистрированы 14 скачкообразных изменений уровня с амплитудами от 4 до 28 мм в течение 2–17 минут, которые не связаны с техногенными помехами. Распределение скачкообразных изменений уровня неравномерное в течение суток и на протяжении всего периода наблюдений, большее количество отмечено в весенне-летний периоды, единичные случаи – осенью (рис. 3, Табл.).

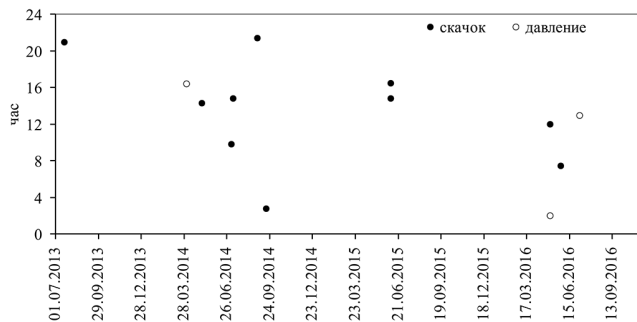


Рис. 3. Диаграмма распределения скачкообразных изменений уровня безнапорного водоносного горизонта

Таблица

№	Дата	Интервал, с (час)	Время скачка, сек			Амплитуда скачка, мм*			Изме- нение, мм/мин	Расход воды <u>скачок</u> фон см³/с	Уро- вень, м
			от	до	все- го	от	до	все- го			
Скачкообразные снижения уровня											
1	02.04.14	57600-61200 (16:00-17:00)	58980	50100	120	23	19	4	-2.0	-	42.9
2	05.05.14	50400-54000 (14:00-15:00)	51360	51480	120	-42	-49	7	-3.5	<u>2.51</u> 0.05	42.9
3	29.08.14	75600-79200 (21:00-22:00)	76980	77340	360	-57	-78	21	-3.3	<u>2.51</u> 0.04	44.0
4	17.09.14	7200-10800 (02:00-03:00)	9900	10140	240	-125	-121	4	-1.0	<u>0.72</u> 0.03	44.2
5	05.06.15	57000-60600 (15:50-16:00)	59220	59340	120	9	-1	10	-5.0	<u>3.58</u> 0.02	45.1
6	06.06.15	51200-54800 (14:10-15:10)	53520	54000	480	78	50	28	-7.0	<u>2.51</u> 0.03	45.2
7	05.05.16	54000-9000 (01:30-02:30)	7080	7320	240	6	-11	17	-4.4	-	45.15
8	28.05.16	70200-73800 (19:30-20:30)	71460	71580	120	-13	-18	5	-2.2	<u>1.79</u> 0.01	44.9
9	05.07.16	46800-50400 (13:00-14:00)	48780	49020	240	-107	-119	12	-3.0	<u>2.15</u> 0.01	45.5
10	06.07.16	45000-46500 (12:30-13:30)	46500	46800	300	-117	-121	4	-0.8	-	45.6
Скачкообразные подъемы уровня											
1	19.07.13	73800-77400 (20:30-21:30)	75300	75540	240	-88	-80	8	+2.0	<u>1.43</u> 0.03	43.9
2	05.07.14	32400-36000 (09:00-10:00)	35220	35400	180	-54	-48	6	+2.0	<u>1.43</u> 0.03	43.6
3	09.07.14	52200-55800 (14:30-15:30)	53280	53520	240	-69	-60	9	+2.5	<u>1.61</u> 0.02	43.6
4	05.05.16	41400-45000 (11:30-12:30)	43140	43260	120	-11	4	15	+7.5	<u>5.37</u> 0.04	45.15

*Значения амплитуд скачкообразных изменений уровня сняты с исходных рядов данных, так как коэффициент когерентности между атмосферным давлением и уровнем в диапазоне часа измерений не превышает 0.2–0.3, а общая компенсация давления приводит к усилению высокочастотной составляющей в колебаниях уровня воды.

Скачкообразные изменения уровня 2 апреля 2014 г., 5 мая и 6 июля 2016 г. с амплитудами от 4 до 17 мм обусловлены высоким градиентом атмосферного давления, превышающим фоновые вариации в 2 и более раз (рис. 4).

Среди остальных 11 скачкообразных изменений отмечено 7 снижений с амплитудами от 4 до 21 мм на протяжении 2–6 минут и 4 подъема уровня с ампли-

тудами от 6 до 15 мм в течение 2–4 минут. Скачкообразные изменения уровня показаны внemasштабно (в виде стрелок) на рис. 2 и по результатам сверки данных регистрации по времени не связаны с техногенными помехами, высоким градиентом атмосферного давления и удаленными сейсмическими событиями.

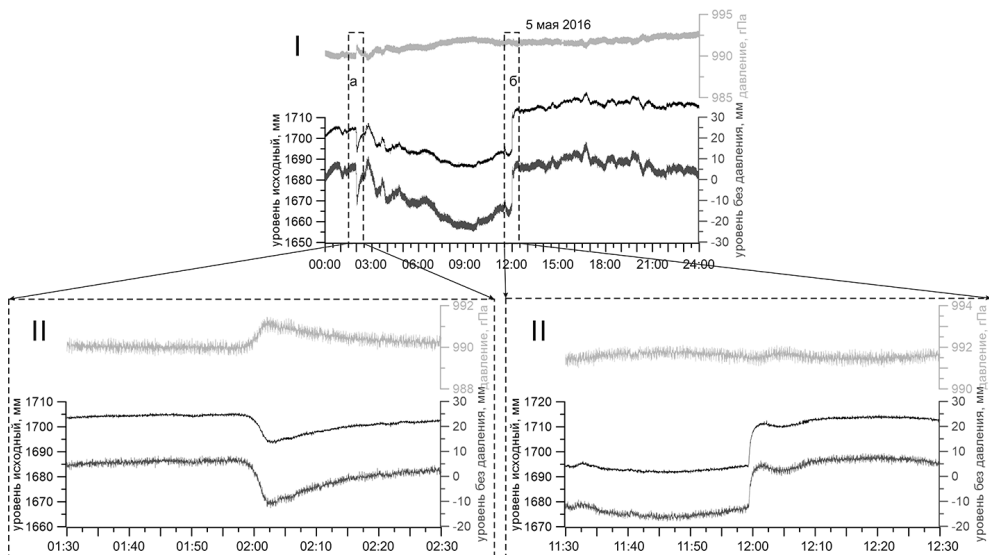


Рис. 4. Скачкообразные изменения уровня, связанные с влиянием естественных факторов в диапазоне суток (I) и 1 часа измерений (II): атмосферным давлением (а) и водопритоком по магистральной трещине (б).

Здесь и далее: исходный уровень - черная линия, отфильтрованный от давления – темно-серая линия, атмосферное давление – светло-серая линия

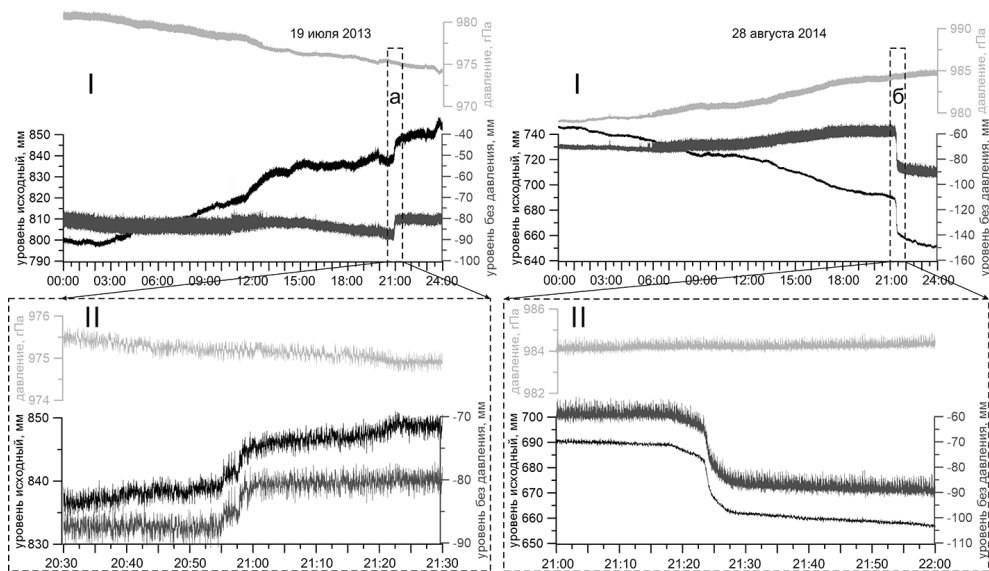


Рис. 5. Скачкообразные изменения уровня в диапазоне суток (I) и 1 часа измерений (II), связанные с обводнением (а) и дренированием (б) магистральных трещин

Сравнительный анализ выделенных интервалов скачкообразных изменений уровня с геолого-геофизическим разрезом скважины указывает на их сопоставимость. Скачкообразные снижения и подъемы уровня преимущественно зарегистрированы в зонах, сопряженных с изменениями степени трещиноватости пород и приурочены к участкам изменения скорости фильтрации в безнапорном водоносном горизонте.

В подошве 1-ой зоны повышенной трещиноватости пород, в интервале 43.9–44.0 м, выделены скачкообразный подъем 19 июля 2013 г. и снижение уровня 29 августа 2014 г. с амплитудами 8–21 мм при диапазоне вариаций атмосферного давления 0.5–0.7 гПа (рис. 5). Подобные изменения, соответствующие общему тренду изменения положения урвенной поверхности (границе раздела между обводненной и осушенной частью коллектора), прослежены в подошве 2-ой зоны. В интервале 45.1–45.2 м установлено снижение 5–6 июня 2015 г. с амплитудами 10–28 мм и подъем 5 мая 2016 г. с амплитудой 15 мм. В кровле 1-ой зоны интенсивной трещиноватости пород на глубине 43.6 м при одной и той же высоте столба воды над датчиком отмечен подъем уровня 5 и 7 июля 2014 г. с амплитудой 6–9 мм.

Скачкообразные «срывы» уровня зарегистрированы при смене квазистационарного режима фильтрации 5 мая 2014 г. с амплитудой 7 мм, изменении скорости снижения уровня 17 сентября 2014 г. с амплитудой 4 мм и в приконтактной зоне известняк-глина 5 июля 2016 г. на глубине 44.9 м с амплитудой 12 мм. В синхронных прецизионных гидрогеологических рядах мониторинга режима нижезалегающего напорного водоносного горизонта, вскрытого в интервале 92–115 м в скважине, расположенной на расстоянии ~ 25 м от проводимых наблюдений, подобные скачкообразные изменения уровня в пределах рассмотренных дат не прослеживаются.

Обсуждение результатов

Неоднородное строение карбонатного коллектора трещинно-порового типа подтверждено результатами геолого-геофизических исследований, проведенных в скважине, петрографического анализ и данными прецизионного мониторинга уровня безнапорного водоносного горизонта. В флюидонасыщенном коллекторе, сложенном тонкоагрегатным кальцитом, наряду с закрытыми порами, кавернами, реликтами микроорганизмов, развиты открытые микротрещины. Отмеченные выше скачкообразные изменения уровня и скорости снижения и подъема уровня косвенно свидетельствуют о дренировании или обводнении подобных магистральных микротрещин соответственно.

Установленные скачкообразные изменения уровня с амплитудами до 28 мм преимущественно приурочены к границам ранее выделенных зон повышенной трещиноватости в разрезе скважины, участкам изменений литологического состава водовмещающих пород и нарушения квазистационарного режима фильтрации. Наличие магистральных микротрещин в подошве обеих зон подтверждено соответствующими подъемами и снижениями уровня при сопоставимой мощности обводненных пород. Наибольшие значения скорости скачкообразных изменений уровня до 7,5 мм/мин отмечены в подошве 2-ой зоны (Табл., рис. 6).

Выделенный тип скачкообразных изменений уровня не связан с постсейсмическим эффектом. Реакция безнапорного водоносного горизонта на удаленные землетрясения обычно регистрируется в виде динамических (косейсмических) вариаций уровня, синхронных с колебаниями грунта, вызванных прохождением поперечных и поверхностных волн [Горбунова и др., 2016a].

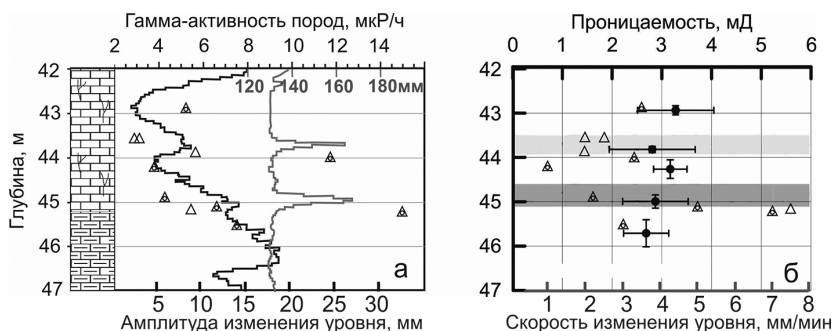


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез с данными гаммаметрии (черная линия) и кавернометрии (серая) (а), и средние значения проницаемости, обозначенные отрезками, рассчитанные по данным восстановления уровня мини депрессионных воронок (б) [Горбунова и др., 2016б]. Дополнено значениями амплитуд (а) и скорости скачкообразных изменений уровня (б) при изменении мощности обводненных пород соответственно. Скачкообразное снижение уровня обозначено треугольником с кружком, скачкообразный подъем – белым треугольником. Серые полосы соответствуют положению интервалов повышенной трещиноватости пород, отмеченных по результатам бурения и геофизических исследований

Трещинно-поровый коллектор отличается высокой сжимаемостью и изменением апертуры микротрещин. Эффективная проницаемость микротрещин пропорциональна расходу воды [Справочное..., 1979; Кочарян, Турунтаев, 2007], но определить ее значения на данном этапе исследований сложно из-за отсутствия сведений по геометрии микротрещин и перепаду давлений. Установленные значения скорости скачкообразных изменений уровня использованы для оценки дополнительного притока (или оттока) воды, поступающего из магистральных микротрещин, который на один-два порядка превышает ежесуточные вариации расхода воды (Таблица). Полученные данные по изменению водопритока в разрезе скважины сопоставлены с ранее проведенной оценкой проницаемости карбонатного коллектора при техногенном воздействии на пласт. По результатам обработки данных по формированию депрессионных мини-воронок при квазистационарных условиях, соответствующих пороупругой деформации, проницаемость коллектора составила 2.6–3.3 мД [Горбунова и др., 2016б]. Соответственно эффективная проницаемость отдельных микротрещин может достигать 330 мД.

Закключение

Данные прецизионных наблюдений за режимом безнапорного водоносного горизонта использованы для диагностики фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора. По результатам визуальной обработки гидрогеологических данных, отфильтрованных от влияния атмосферного давления, за период наблюдений 2013–2016 гг. на фоне суточных колебаний уровня, составляющих 3–5 см/сут, выделены скачкообразные изменения уровня, не связанные с техногенными помехами, перепадами атмосферного давления и влиянием удаленных землетрясений.

Скачкообразные изменения уровня преимущественно зарегистрированы в весенне-летнее время, которое сопровождается изменением мощности обводнен-

ной части флюидонасыщенного коллектора. Скачкообразные подъемы и снижения уровня установлены в зоне распространения магистральных трещин и на контакте «известняк-глина», в условиях нарушения квазистационарного режима фильтрации. Изменение гидростатического давления и соотношения между срединированной (осушенной) и обводненной частью карбонатного коллектора, характеризующегося двойной пористостью, может приводить к изменению апертуры магистральных трещин и их проницаемости.

Новые данные по выделению скачкообразных изменений уровня дополняют информацию об особенностях строения и основных параметрах изучаемого карбонатного коллектора, регистрируемых при изменении мощности его обводненной части. Полученные результаты представляют определенный интерес, так как, вероятно, приближают нас к пониманию механизма реакции флюидонасыщенного коллектора на факторы различного типа, в частности, к условиям проявления постсейсмических изменений уровня подземных вод.

Работа выполнена в рамках Гос. задания (проект № 0146-2014-0008).

Литература

Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Резниченко О.Ю. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.

Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Землетрясения транскавказского сейсмического пояса в вариациях уровня подземных вод Московского артезианского бассейна // Геология, геодинамика и геоэкология Кавказа: Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. Выпуск 66. Махачкала : Институт геологии ДНЦ РАН, «АЛЕФ». 2016а. С. 167–173.

Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А., Свинцов И.С. Оценка проницаемости трещинно-порового коллектора при эпизодическом техногенном воздействии // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8: Сб. научных трудов ИДГ РАН. М. : ГЕОС. 2016б. С. 42–51.

Кочарян Г.Г., Турунтаев С.Б. Введение в геофизику месторождений углеводородов. М. : МФТИ. 2007. – 348 с.

Справочное руководство гидрогеолога. Т. 1. Л. : Недра. 1979. – 512 с.

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.

Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability // Letters. 2006. V. 441. P. 1135–1138. (Supplementary Material for Nature manuscript 2005-11-13339 Seismic Waves Increase Permeability), doi:10.1038/nature04798.

Gorbunova E., Vinogradov E., Besedina A. Aquifer properties distant control // 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, www.sgem.org, SGEM2017 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-99-5 / ISSN 1314-2704 / DOI: 10.5593/sgem2017/12, 29 June–5 July, 2017, Albena, Bulgaria. Conference proceedings. Volume 17. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. ISSUE 12. Hydrogeology, engineering geology and geotechnics. P. 71–78

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

Kitagawa Y., Itaba S., Matsumoto N., Koizumi N. Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high frequency domain // *Journal of Geophysical research*. 2011. V. 116. B08301. P. 1–12, doi:10.1029/2010JB007794.

Lai G., Ge H., Wang W. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 1904–1924, doi:10.1002/jgrb.50165.

Xue L., Brodsky E.E., Erskine J., Fulton P.M., Carter R. A permeability and compliance contrast measured hydrogeologically on the San Andreas Fault // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2016. DOI: 10.1002/2015GC006167.