

УДК 550.34.06.03.2

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ “ПЛАСТ–СКВАЖИНА” НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА БАРОМЕТРИЧЕСКОГО И ПРИЛИВНОГО ОТКЛИКОВ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ

© 2009 г. Г. Н. Копылова¹, Э. М. Горбунова², С. В. Болдина¹, Д. В. Павлов²

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Институт динамики геосфер РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 25.12.2008 г.

На основании исследования барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине, расположенной на территории геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН “Михнево”, установлены статически изолированные условия в рассматриваемой гидрогеологической системе “пласт–скважина” на периодах ≥ 3 ч. Оценены значения барометрической эффективности, приливной чувствительности уровня воды, упругие параметры и пористость водовмещающих пород. Построена модель инерционности водообмена в системе “пласт–скважина” в зависимости от периода вариаций с учетом конструкции скважины, водопроницаемости и упругой емкости водоносного горизонта. Результаты моделирования находятся в соответствии с поведением амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды. По результатам обработки данных прецизионных измерений уточнена величина водопроницаемости водоносного горизонта, полученная по данным опытно-фильтрационных работ.

PACS: 91.45.Xz

ВВЕДЕНИЕ

Прецизионные наблюдения за вариациями уровня подземных вод представляют традиционный компонент системы геофизического мониторинга, направленного на диагностику напряженно-деформированного состояния геологической среды (НДСС). В сейсмоактивных районах России (на Дальнем Востоке, Забайкалье, Северном Кавказе) такие измерения целенаправленно проводятся в течение последних десятилетий с целью поиска предвестников землетрясений [Копылова и др., 2007]. В асейсмичных регионах России, преимущественно в пределах Московского артезианского бассейна (МAB), прецизионные уровнемерные наблюдения выполнялись эпизодически и, в основном, были направлены на изучение приливного отклика уровня воды в скважинах [Любушин и др., 1997; Багмет и др., 1989].

С февраля 2008 г. в скважине, расположенной на территории геофизической обсерватории Института динамики геосфер РАН “Михнево” (ГО ИДГ РАН “Михнево”), приуроченной к южной окраине МAB, организованы высокоточные уровнемерные наблюдения, синхронные с измерениями атмосферного давления на приустьевой площадке. Полученный ряд данных использовался для изучения барометрического и приливного откликов уровня воды и оценки инерционности водообмена в системе “пласт–скважина” с целью выделения частотного

диапазона регистрации сигнала, информативного для определения деформации водовмещающих пород опорного водоносного горизонта.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ОПЫТ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ УРОВНЕМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В асейсмичном регионе в вариациях уровня воды в скважинах, вскрывающих напорные водоносные горизонты, могут проявляться отклики на упругую деформацию водовмещающих пород, обусловленные постоянно действующими факторами атмосферной нагрузки и лунно-солнечных приливов.

Если скважина вскрывает изолированный водоносный горизонт, фильтрацией воды в котором можно пренебречь, и водообмен между насыщенными горными породами и стволом скважины не искажает реакцию уровня на изменение порового давления, то, в этом случае, вариациям атмосферного давления будет соответствовать отклик уровня, амплитуда которого Δh_b линейно связана с вертикальной барометрической нагрузкой Δb :

$$\Delta h_b = -(1/\rho_v g)[1 - (B/3)(1 + v_u)/(1 - v_u)]\Delta b. \quad (1)$$

Приливы в твердой Земле сопровождаются объемной деформацией водонасыщенных горных пород. В этом случае амплитуда приливного отклика

уровня воды в скважине Δh_t пропорциональна амплитуде деформации $\Delta \epsilon$:

$$\Delta h_t = -(1/\rho_w g)(2GB/3)[(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)]\Delta \epsilon, \quad (2)$$

где ρ_w – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Коэффициенты связи в (1)–(2) определяются упругими параметрами резервуара: модулем сдвига G , коэффициентом Скемптона B и коэффициентами Пуассона для недренированных условий ν_u [Roeloffs, 1988].

В практике равномерных наблюдений для характеристики барометрического отклика уровня используется величина барометрической эффективности $E_b = -\Delta h_t/\Delta b$ и ее зависимость от периода вариаций. Если в некотором диапазоне периодов обнаруживаются постоянные значения E_b , то это означает, что в этом диапазоне водообмен между скважиной и насыщенными горными породами, а также фильтрационные процессы, не оказывают искажающего воздействия на проявление барометрического отклика уровня воды. В пределах проявления статической величины барометрической эффективности оценивается диапазон периодов вариаций уровня воды, представительный для определения приливного отклика и оценки деформометрических свойств наблюдательной системы “пласт–скважина”.

Для характеристики приливного воздействия в отфильтрованных рядах измерений уровня воды после снятия эффекта барометрической нагрузки выделяются амплитуды отдельных приливных волн и оцениваются фазовые соотношения между приливными вариациями уровня и соответствующими компонентами приливного гравитационного потенциала. Величина приливной чувствительности уровня воды A_v по отношению к теоретической или экспериментально зарегистрированной приливной деформации горных пород может быть рассчитана по соотношению:

$$A_v = -\Delta h_t/\Delta \epsilon, \quad (3)$$

где Δh_t – амплитуда приливных вариаций уровня воды, см; $\Delta \epsilon$ – амплитуда приливных изменений объемной деформации, 10^{-9} .

В работах [Копылова, 2006; Копылова и др. 2007; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989] в качестве важного показателя информативности равномерных наблюдений рассматривается обнаружение статически изолированного отклика уровня воды в скважинах наблюдательной сети и оценка его параметров – диапазона периодов проявления и величины приливной чувствительности уровня воды. Выделенный статически изолированный отклик уровня воды линейно связан с деформацией водовмещающего пласта и зависит от упругих параметров горных пород по (2).

Ограничение диапазона периодов статически изолированного отклика уровня воды в высокоча-

стотной области определяется инерционными свойствами системы “пласт–скважина” вследствие наличия ненулевой массы воды в стволе скважины. Для того, чтобы вариации уровня воды полностью отражали изменения порового давления, необходимо определить интервал периодов, соответствующий режиму стабилизации (равновесия) гидрогеологической системы “пласт–скважина”, зависящий от конструкции скважины и фильтрационных характеристик водовмещающих пород.

В работе [Hsieh et al., 1987] предложена математическая модель изменений уровня воды в скважине при гармонических вариациях порового давления в пласте с учетом конструкции скважины (величин радиусов обсаженной r_c и открытой частей ствола r_w), водопроницаемости T и упругой емкости водовмещающих пород S . Рассматриваемая математическая модель основана на оценке зависимостей амплитудного соотношения и фазового сдвига между вариациями напора в водоносном пласте и уровня воды в скважине от периода вариаций. Для отдельных скважин эта модель адекватно описывает инерционность водообмена в системе “пласт–скважина” при изменении барометрической нагрузки [Болдина, Копылова, 2006].

В низкочастотной области граница статически изолированного отклика уровня воды определяется, в основном, гидрогеологическими условиями – периодичностью и интенсивностью питания подземных вод, фильтрационными свойствами водовмещающих пород и параметрами подземного потока (скорость, расход) [Копылова, 2006; Rojstaczer, 1988].

Для скважин, вскрывающих изолированные напорные водоносные горизонты, диапазон периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды может изменяться в широких пределах: от минут–первых часов до суток–десятков суток. В этом диапазоне в изменениях уровня воды могут проявляться вариации, соответствующие изменениям напряженно-деформированного состояния водоносного пласта при геодинамической активизации геологической среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе на основе изучения отклика уровня воды на барометрическое и приливное воздействие проводится оценка деформометрических и гидрогеологических параметров водоносного горизонта, вскрытого наблюдательной скважиной, расположенной в пределах асейсмичного региона. Выполнялся кросс-спектральный анализ вариаций уровня воды и атмосферного давления для определения величины барометрической эффективности E_b и ее зависимости от периода вариаций, а также приливной анализ вариаций уровня воды в диапазоне периодов 2–30 ч. по программе ETERNA 3.0

[Wenzel, 1994] с оценкой приливной чувствительности уровня воды по отношению к теоретическим величинам объемной и площадной деформации.

Для статически изолированных условий в системе “пласт–скважина” определены упругие параметры водовмещающих пород и пористость с использованием формул теории пороупругости [Rojstaczer, Agnew, 1989]. Фильтрационные и упругие параметры водоносного горизонта также оценивались по данным опытно-фильтрационных работ и по результатам анализа приливного и барометрического откликов уровня воды в скважине. Выполнено сопоставление результатов моделирования инерционности водообмена в системе “пласт–скважина” по [Hsieh et al., 1987] с изменением барометрической эффективности в зависимости от периода вариаций и с гидрогеологическими параметрами, рассчитанными по данным опробования скважины.

ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИНЫ И ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Прецизионные измерения вариаций уровня в скважине № 2 выполняются на территории ГО ИДГ РАН “Михнево”, расположенной на расстоянии 3 км западнее д. Починки Ступинского района Московской области. Скважина № 2 (координаты 54.96° с.ш., 37.77° в.д., абсолютная отметка устья 167.5 м) оборудована погружным зондом LMP 308i (Германия) с точностью измерений вариаций уровня воды 0.5 мм и периодичностью опроса 1 с. В интервале 0–91 м скважина обсажена металлической колонной труб диаметром 127 мм. Ниже до глубины 115 м ствол скважины диаметром 118 мм открыт.

Стационарные наблюдения проводятся за изменением уровня алексинско-тарусского водоносного напорного горизонта, вскрытого в интервале 76.1–115 м и представленного неравномерно трещиноватыми известняками нижнекаменноугольного возраста с прослоями глин и мергелей. Перекрывающим водоупором является горизонт глин среднекаменноугольного возраста мощностью 19.5 м, отделяющий известняки от вышележащей толщи, сложенной карбонатно-терригенными отложениями среднекаменноугольного возраста, водно-ледниковыми и моренными отложениями четвертичного возраста.

Уровень воды в скважине установился на глубине 68 м при величине избыточного напора в пределах алексинско-тарусского водоносного горизонта 8.1 м относительно кровли. Радиус обсадной колонны труб в зоне вариаций уровня подземных вод составляет $r_c = 0.064$ м, в интервале водоприемной части скважины $r_w = 0.059$ м.

По окончании бурения в скважине № 2 выполнен комплекс геофизических исследований и опытно-фильтрационных работ. Водопроницаемость T

вскрытой толщи алексинско-тарусского водоносного горизонта мощностью m до 38.9 м по данным расходомерии и опытного налива не превышает 2.1 м²/сут., по данным прокачки – 4.0 м²/сут. В выделенных по результатам расходомерии интервалах водопритока на глубинах 92–94 м и 99–100 м величина водопроницаемости достигает 13 м²/сут. Величина коэффициента фильтрации k в пределах вскрытой толщи по данным трех методов опытно-фильтрационных исследований находится в диапазоне 0.06–0.16 м/сут. По данным экспресс-опробования алексинско-тарусского водоносного горизонта величины пьезопроводности a и упругой водоотдачи μ^* составляют соответственно 1.3×10^{-4} м²/сут. и 2.3×10^{-4} .

На рис. 1 приведен фрагмент данных непрерывных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления с 6 февраля по 2 июня 2008 г. при их усреднении в окне 100 с. В изменениях уровня воды прослеживаются барометрические вариации, синхронно повторяющие изменения атмосферного давления, а также сезонный тренд с амплитудой около 1 м. Кроме этого, в вариациях уровня воды периодически присутствует техногенная помеха. Амплитуда вариаций уровня во время проявления помехи достигает 4.0–6.5 см, продолжительность – до нескольких часов. В записях атмосферного давления помеха проявляется редко и в ослабленном виде с амплитудой, не превышающей 1.5 гПа.

Для подавления влияния помехи на барометрические и приливные вариации уровня воды выполнен переход от 100-секундных данных измерений к среднечасовым. На рис. 2 представлен фрагмент среднечасовых вариаций уровня воды и атмосферного давления, полученных усреднением 100-секундных данных в окне 36 отсчетов с шагом 36 отсчетов. Эта процедура удовлетворительно компенсирует помеху в среднечасовых данных. Кроме этого, в изменениях уровня воды более четко, по сравнению с исходными записями, проявляются суточные и полусуточные вариации, имеющие земно-приливное происхождение. Полученные временные ряды среднечасовых значений уровня воды и атмосферного давления использовались для определения параметров барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине № 2.

БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК УРОВНЯ ВОДЫ

Оценка параметров барометрического отклика уровня воды проводилась методом кросс-спектрального анализа [Любушин, 2007]. Для этого выполнялось построение усредненной в скользящем окне 256 ч. кросс-периодограммы двух скалярных временных рядов: входного сигнала $X(t)$ – атмосферное давление и выходного сигнала $Y(t)$ – уровня воды. Перед расчетом кросс-периодограммы осу-

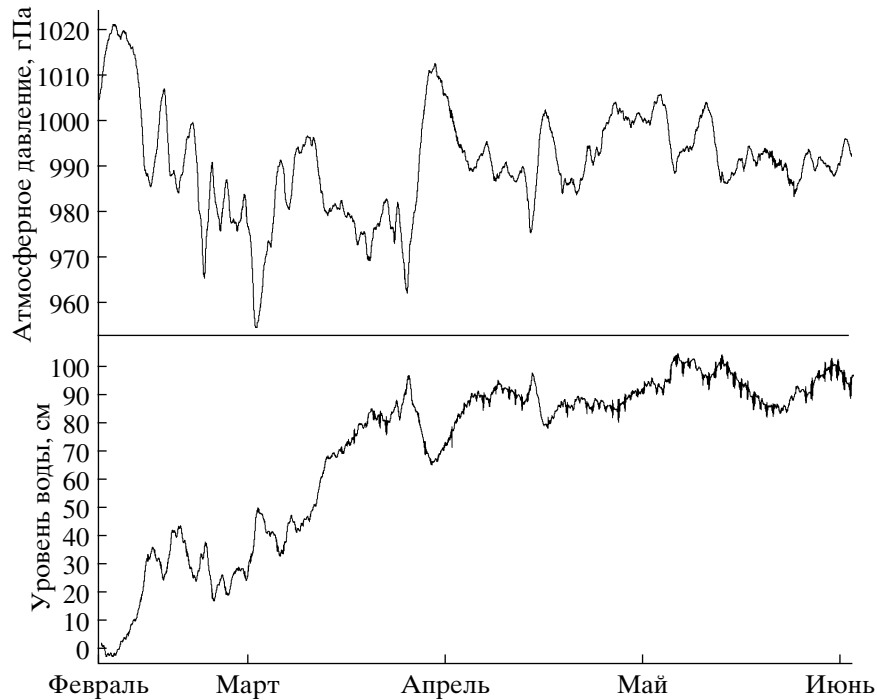


Рис. 1. Изменения уровня воды и атмосферного давления в скважине № 2 с 6 февраля по 2 июня 2008 г.



Рис. 2. Вариации среднечасовых значений атмосферного давления и уровня воды в скважине № 2 с 1 по 10 апреля 2008 г. (показаны жирными черными линиями), наложенные на 100-секундные вариации (показаны серыми линиями).

щественно осуществлялся переход от исходных среднечасовых временных рядов $X(t)$ и $Y(t)$ к их первым разностям для подавления низкочастотных трендов в обоих сигналах.

Проводилось также предварительное удаление из исходных временных рядов $X(t)$ и $Y(t)$ частотных полос в интервалах полусуточных и суточных периодов 11–13 ч. и 23–27 ч. с использованием идеально-

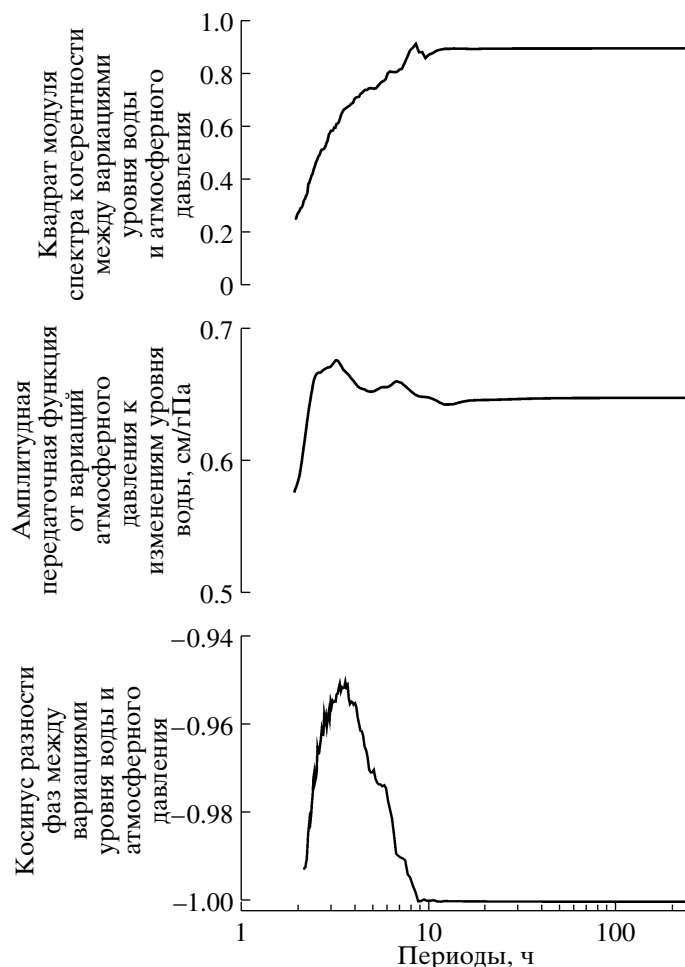


Рис. 3. Результаты кросс-спектрального анализа среднечасовых вариаций уровня воды и атмосферного давления.

го фильтра. По усредненной кросс-периограмме рядов $X(t)$ и $Y(t)$ выполнена непараметрическая оценка функций квадрата модуля спектра когерентности, амплитудной передаточной функции (АПФ) от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды и косинуса разности фаз в зависимости от периода вариаций (рис. 3).

Верхний график (рис. 3) характеризует когерентность вариаций атмосферного давления и уровня воды в зависимости от периода. Видно, что величина когерентности плавно возрастает от 0.2 до максимальной величины 0.89 в диапазоне периодов от 2 ч., до примерно 8 ч. Такое возрастание обусловлено, с одной стороны, инерционным эффектом водообмена в системе “пласт–скважина” и ослаблением отклика уровня воды на барометрическую нагрузку на относительно малых периодах и, с другой стороны, наличием шумовых вариаций в обоих временных рядах, понижающих устойчивость оцениваемой величины когерентности.

В поведении АПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (средний гра-

фик на рис. 3) выделяются три интервала: 1 – быстрое возрастание от 0.58 до 0.66 см/гПа в диапазоне 2–3 ч., 2 – неустойчивое поведение с колебанием величины АПФ в области 0.66–0.68 см/гПа в диапазоне 3–10 ч., 3 – стабилизация величины АПФ на значении 0.65 см/гПа в диапазоне периодов ≥ 11 ч. Такое поведение АПФ показывает, что инерционность водообмена в системе “пласт–скважина” оказывает существенное влияние только на малых периодах формирования барометрического отклика уровня, не превышающих 3 ч. Наличие отрезка неустойчивости связано либо с особенностями формирования барометрического отклика уровня воды в скважине № 2, либо с шумовыми эффектами.

По поведению АПФ оценивается величина барометрической эффективности E_b , характеризующая статически изолированный отклик уровня на барометрическую нагрузку [Копылова, 2006]. Величина $E_b = 0.65$ см/гПа на периодах ≥ 3 ч. принимается в качестве характеристики барометрического отклика уровня воды в скважине № 2 для статически изолированных условий. Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления

Таблица 1. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине № 2 по программе ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]

Волна, период, ч.	Амплитуда объемной деформации $\Delta\epsilon$, 10^{-9}	Амплитуда уровня воды, Δh_t , см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, $\text{см}/10^{-9}$	Фазовый сдвиг, град
Q_1 26.87	1.38	0.066	15.9	0.048 ± 0.020	-177 ± 24
O_1 25.82	7.18	0.381	89.8	0.053 ± 0.004	-178 ± 4
M_1 24.83	0.56	0.024	4.9	0.042 ± 0.048	-134 ± 65
P_1S_1 23.93	10.10	0.393	81.6	0.039 ± 0.003	-155 ± 4
J_1 23.10	0.56	0.012	2.9	0.021 ± 0.048	-172 ± 133
OO_1 22.31	0.31	0.014	4.9	0.046 ± 0.088	-174 ± 111
$2N_2$ 12.87	0.19	0.010	2.6	0.052 ± 0.038	-131 ± 42
N_2 12.66	1.19	0.071	14.9	0.060 ± 0.006	-178 ± 6
M_2 12.42	6.24	0.381	76.5	0.061 ± 0.001	-179 ± 1
L_2 12.19	0.18	0.006	1.1	0.032 ± 0.041	-146 ± 73
S_2K_2 12.00	2.90	0.201	47.9	0.069 ± 0.002	-170 ± 2

Примечание: 1 – жирным шрифтом выделены волны в изменениях уровня воды при величинах отношения сигнал/шум ≥ 10 ; 2 – величина регрессионного коэффициента связи между вариациями уровня воды и атмосферного давления на периодах 2–30 ч составляет -0.652 ± 0.005 см/гПа.

в рассматриваемом диапазоне периодов составляет $-160^\circ \dots -180^\circ$ и достигает стабильного значения -180° на периоде ≥ 8 ч. (нижний график на рис. 3).

Результаты барометрического анализа показывают, что полный барометрический отклик уровня воды в скважине № 2 проявляется на периодах ≥ 3 ч. и характеризуется величиной барометрической эффективности $E_b = 0.65$ см/гПа. В диапазоне периодов от 3 ч. до примерно первых сотен часов можно предполагать наличие в системе “пласт–скважина” статически изолированных условий.

ПРИЛИВНОЙ ОТКЛИК УРОВНЯ ВОДЫ

В табл. 1 приведены результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине № 2. Названия приливных волн даны по [Мельхиор, 1968]. В изменениях уровня воды выделены пять мощных приливных волн Q_1 , O_1 , N_2 , M_2 и S_2K_2 с амплитудами $\Delta h_t = 0.066\text{--}0.381$ см при величинах отношения сигнал/шум 15–90. Это указывает на достаточно надежное определение приливных амплитуд Δh_t в изменениях уровня воды для этих волн. Величины амплитудных факторов для них, равные отношению выделенных амплитуд в изменениях уровня

воды Δh_t к соответствующим величинам теоретической объемной деформации $\Delta\epsilon$, составляют $0.048\text{--}0.069$ см/10⁻⁹. Для всех пяти волн получены также хорошие оценки разности фаз между волнами в изменениях уровня воды и соответствующими компонентами приливного гравитационного потенциала (т.е. близкие к -180°). Результаты оценок по волне P_1S_1 , период которой наиболее близок к суточному, в дальнейшем не рассматриваются из-за сильной зашумленности вариаций уровня воды действием метеофакторов на суточном периоде.

На рис. 4 представлен график зависимости амплитуд, выделенных в изменениях уровня воды пяти приливных волн от соответствующих величин теоретической объемной деформации. Линейная зависимость при 95%-ой доверительной вероятности и величине коэффициента корреляции $R = 0.99$ описывается уравнением:

$$\Delta h_t = (0.056 \pm 0.002)\Delta\epsilon + (0.010 \pm 0.047). \quad (6)$$

Величина наклона линейной зависимости 0.056 ± 0.002 см/10⁻⁹ характеризует приливной отклик уровня воды в скважине № 2 во всем диапазоне суточных и полусуточных периодов и принимается в качестве величины приливной чувствительности

уровня воды A_v по отношению к объемной деформации водовмещающих пород.

Для расчета упругих параметров и пористости водовмещающих пород по [Rojstaczer, Agnew, 1989] также выполнена оценка амплитудных факторов для отдельных волн по отношению к приливной площадной деформации, равной сумме двух ее горизонтальных компонент, с использованием приливного анализа урвнмерных данных по программе ETERNA 3.0. Полученная величина приливной чувствительности уровня воды по отношению к площадной деформации составляет $A_s = 0.037 \text{ см}/10^{-9}$.

ОЦЕНКА УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ И ПОРИСТОСТИ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

В используемой модели принято, что водовмещающие породы представляют относительно изолированный протяженный водонасыщенный пласт, сложенный пористым упругим материалом с активной (открытой) пористостью. Подобные природные объекты при условии однородности и изотропности в изотермических условиях могут описываться линейной теорией пороупругости [Rice, Cleary, 1976], которая включает систему уравнений, связывающих изменения деформации и напряжения в скелете породы с поровым давлением с учетом сжимаемости скелета и упругого изменения объема воды.

Расчетные формулы для оценки дренированной (при условии постоянства порового давления) сжимаемости скелета с учетом пор β , коэффициента Скемптона B , модуля сдвига G и пористости водовмещающих пород ϕ приведены в [Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006] применительно к системе “пласт–скважина”, для которой установлен статически изолированный отклик уровня воды и определены величины барометрической эффективности E_b и приливной чувствительности A_s . При этом полагаются известными табличные величины сжимаемости воды β_f и сжимаемости твердой фазы скелета β_s . Также принимается примерное равенство величин β_s – сжимаемости твердой фазы скелета и недренированной (при условии постоянства массы флюида) сжимаемости скелета с учетом пор β_u . Величина удельной упругой емкости водовмещающих пород S_s определяется как $S_s = \rho g(\beta + \phi\beta_f)$.

В табл. 2 показаны величины упругих параметров и пористости алексинско-тарусского водоносного горизонта, рассчитанные для условий статиче-

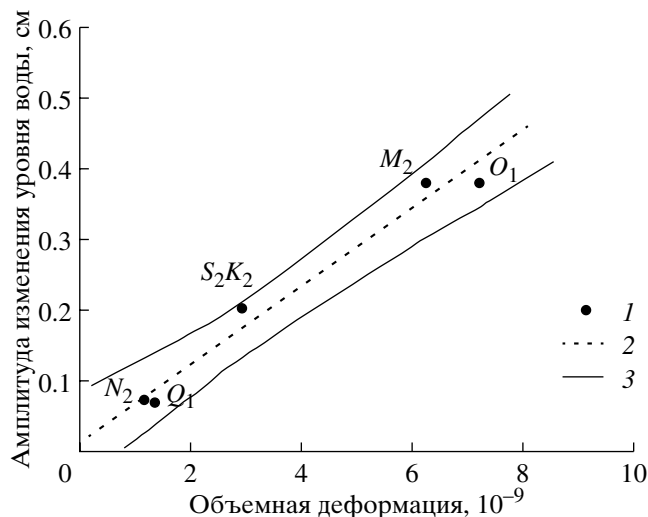


Рис. 4. График зависимости выделенных в изменениях уровня воды амплитуд приливных волн от соответствующих величин объемной деформации: 1 – приливные волны; 2 – линейный тренд зависимости приливных амплитуд в изменениях уровня воды от соответствующих величин приливной объемной деформации; 3 – 95%-ый доверительный интервал линейной зависимости.

ски изолированного отклика уровня воды в скважине № 2 по [Rojstaczer, Agnew, 1989; Копылова, Болдина, 2006] при величинах недренированной сжимаемости $\beta_u = 0.3 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, сжимаемости воды $\beta_f = 4.4 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ и характерной величине коэффициента Пуассона $\nu = 0.25$. Величина упругой емкости водоносного пласта S рассчитывалась по формуле $S = S_s m$, где m – вскрытая мощность алексинско-тарусского водоносного горизонта (38.9 м), и составляет $0.9\text{--}1.4 \times 10^{-4}$. Величина S примерно соответствует упругой водоотдаче $\mu^* = 2.3 \times 10^{-4}$, полученной по данным обработки экспресс-налива в скважину.

ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННОСТИ ВОДООБМЕНА В СИСТЕМЕ “ПЛАСТ–СКВАЖИНА”

При рассмотрении барометрического и приливного воздействия на поведение изолированного водовмещающего пласта можно пренебречь латеральной фильтрацией подземного потока, так как значительный пространственный радиус действия указанных факторов предполагает отсутствие горизонтальных градиентов порового давления. Кро-

Таблица 2. Расчетные величины упругих параметров и пористости водовмещающих пород

Барометрическая эффективность E_b , см/гПа	Приливная чувствительность уровня воды A_s , м/10 ⁻⁷	Дренированная сжимаемость скелета β , Па ⁻¹ × 10 ⁻¹¹	Модуль сдвига G , Па × 10 ¹⁰	Коэффициент Скемптона B	Удельная упругая емкость S_s , м ⁻¹ × 10 ⁻⁷	Пористость ϕ
0.65	0.037	16.2	0.37	0.40	36.9	0.49

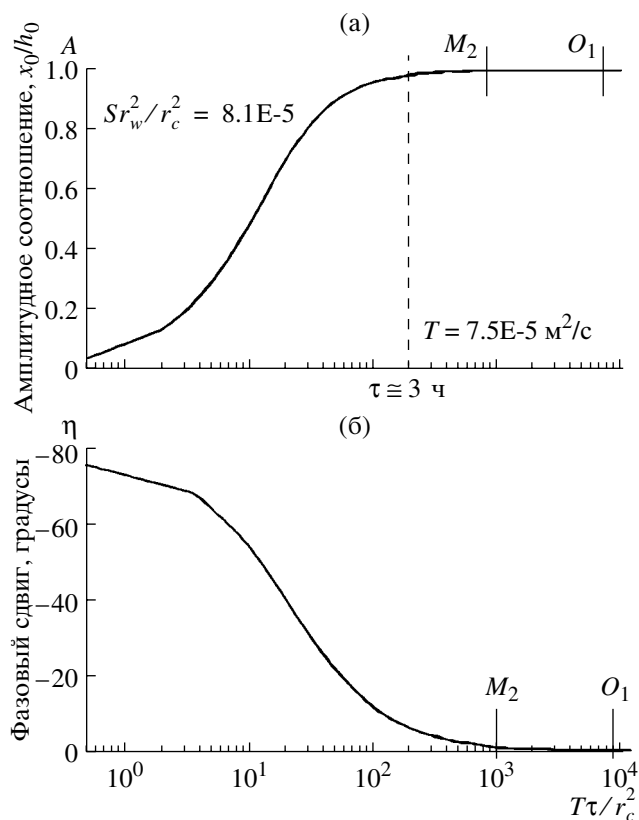


Рис. 5. Графики амплитудного соотношения x_0/h_0 (а) и фазового сдвига η (б) между вариациями уровня воды в скважине № 2 и напором в водоносном горизонте при величине упругой емкости $S = 1 \times 10^{-4}$. Пунктирной вертикальной линией показана величина амплитудного соотношения $x_0/h_0 \sim 1$ на периоде $\tau = 3$ ч. при величине водопроводимости $T = 7.5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут}$ ($6.48 \text{ м}^2/\text{сут}$). M_2 , O_1 – приливные волны с периодами 12.42 ч. и 25.82 ч. соответственно.

ме этого, при совершенной изоляции алексинско-тарусского водоносного горизонта региональным водоупором (практически непроницаемыми глинами) вертикальный переток из вышележащего водоносного горизонта исключается. Это подтверждается данными стационарных наблюдений за гидродинамическими параметрами вышележащего каширского и алексинско-тарусского водоносных горизонтов, характеризующихся разницей напоров, достигающей 43.2 м.

В этом случае для любого периодического возмущения порового давления с амплитудой p_0 на достаточно длинных периодах уровень воды в скважине x_0 отслеживает напор в пласте h_0 как

$$x_0 = p_0 / \rho_{вг} g = h_0. \quad (7)$$

Но на относительно малых периодах изменения порового давления в водоносном пласте пиковое значение уровня воды будет меньше, чем по (7), и будет запаздывать по отношению к пику напора h_0 за счет инерционности водообмена в системе

“пласт–скважина”. Тогда амплитудное соотношение (отношение амплитуд вариаций уровня воды в скважине и гидростатического напора в водоносном горизонте) рассчитывается как $A = x_0/h_0$, фазовый сдвиг $\eta = \arg(x_0/h_0)$.

Определение зависимости параметров A и η от периода вариаций порового давления с учетом фильтрационных и упругих свойств водовмещающих пород и конструкции скважины характеризует степень инерционности водообмена в рассматриваемой системе “пласт–скважина”. Выражения для периодического понижения уровня воды в скважине, амплитудного соотношения и фазового сдвига с учетом водопроводимости T , упругой емкости водовмещающих пород S и радиусов скважины в зоне колебаний уровня воды r_c и в водоприемной части скважины r_w приводятся в работах [Hsieh et al., 1987; Болдина, Копылова, 2006]. Теоретические зависимости амплитудного соотношения и фазового сдвига по [Hsieh et al. 1987] также могут использоваться для уточнения водопроводимости водоносного горизонта T .

Графики амплитудного соотношения A и сдвига фаз η при различных значениях величин $T\tau/r_c^2$, где τ – период вариаций в секундах, и Sr_w^2/r_c^2 для скважины № 2 представлены на рис. 5 и рис. 6. При построении графика на рис. 5 использовалась расчетная величина $S = 1 \times 10^{-4}$, полученная по результатам анализа барометрического и приливного откликов уровня воды. При этом водопроводимость T определялась подбором из условия наилучшего соответствия результата моделирования инерционного эффекта водообмена и поведения амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (рис. 3). Критерием выбора величины $T = 6.48 \text{ м}^2/\text{сут}$ являлось достижение амплитудного соотношения $x_0/h_0 \approx 1$ на периоде ~ 3 ч и приближение величины фазового сдвига η к 0° .

При использовании величин $T = 3.0 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 2.3 \times 10^{-4}$, полученных по данным опытно-фильтрационных работ, достижение амплитудного соотношения $x_0/h_0 \approx 1$ и фиксация полного отклика уровня воды на периодические вариации давления в пласте происходит на большем периоде, составляющем $\tau = 5$ ч. 30 мин. (рис. 6). Возможно, это связано с тем, что опытно-фильтрационные работы проводились непосредственно после бурения скважины в течение 12-ти часов и не привели к полной расколматации трещин и каверн в водовмещающих породах после бурения. По-видимому, этим обусловлено относительно заниженное значение водопроводимости алексинско-тарусского водоносного горизонта, полученное по данным опытно-фильтрационных работ.

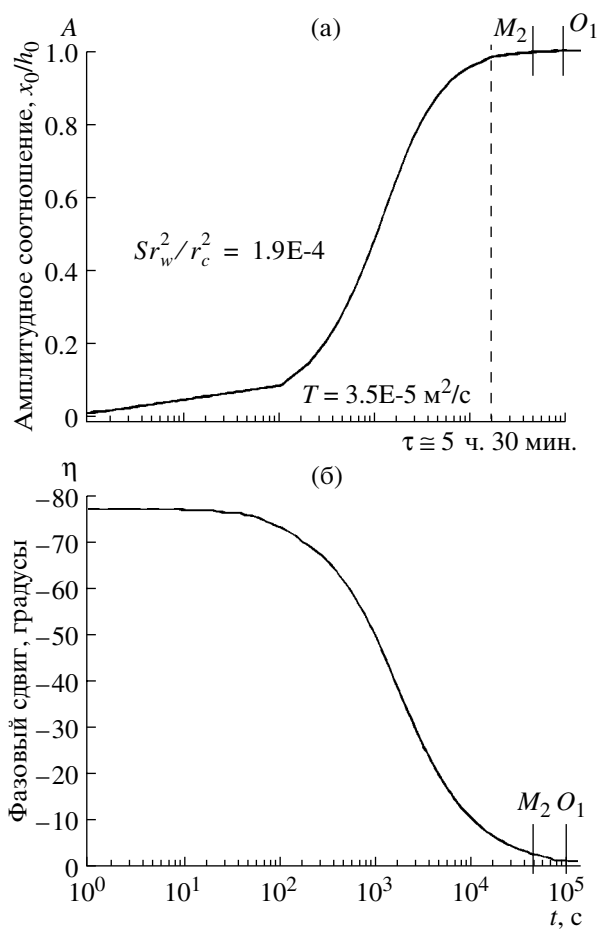


Рис. 6. Графики амплитудного соотношения x_0/h_0 (а) и фазового сдвига η (б) между вариациями уровня воды в скважине № 2 и напором в водоносном горизонте при величинах $T = 3.5 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут.}$ ($3 \text{ м}^2/\text{сут.}$) и $\mu^* = S = 2.3 \times 10^{-4}$, полученных по данным опробования скважины. Пунктирной вертикальной линией показана величина амплитудного соотношения $x_0/h_0 \sim 1$ на периоде $\tau = 5 \text{ ч. } 30 \text{ мин.}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследования барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине № 2 предполагается наличие статически изолированных условий в рассматриваемой системе “пласт–скважина” на периодах $\geq 3 \text{ ч.}$ при периодических изменениях порового давления, вызванных изменениями НДСС. Оценены величины барометрической эффективности $E_b = 0.65 \text{ см/гПа}$, приливной чувствительности уровня воды по отношению к теоретической объемной деформации $A_v = 0.056 \text{ см}/10^{-9}$ и величины упругих параметров и пористости водовмещающих пород (табл. 2).

Вероятно, на периодах $\geq 3 \text{ ч.}$ скважина № 2 будет вести себя подобно объемному деформографу, и в вариациях уровня воды будут прослеживаться изменения порового давления, обусловленные действием геодинамических факторов. По амплитудам вы-

явленных аномальных изменений уровня воды и величине A_v могут количественно оцениваться величины объемной деформации водовмещающих пород $\Delta \epsilon$.

Вместе с тем, нижняя граница периодов проявления статически изолированных условий для скважины № 2 не определена, но, по аналогии с другими скважинами, характеризующимися статически изолированным откликом уровня воды и близкими фильтрационными и упругими параметрами водовмещающих пород, предположительно, составляет не менее первых сотен часов. Для более точного определения этой границы необходимо получить ряд наблюдений не менее 1–2-х лет.

По изменению величины барометрической эффективности в зависимости от периода вариаций выделен высокочастотный диапазон на периодах от первых минут до полусуток, характеризующийся неустойчивым барометрическим откликом уровня воды за счет инерционности водообмена в системе “пласт–скважина” в диапазоне периодов $< 3 \text{ ч.}$ и, возможно, за счет техногенной помехи. В этом диапазоне периодов оценка деформации контролируемого скважиной водонасыщенного пласта при периодических изменениях НДСС затруднена.

Моделирование эффекта водообмена в системе “пласт–скважина” по модели [Hsieh et al., 1987] с учетом конструкции скважины и с использованием расчетных и экспериментально определенных величин водопроводимости T и упругой емкости S , а также сопоставление полученных результатов с поведением амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня позволило уточнить величину водопроводимости алексинско-тарусского водоносного горизонта для рассматриваемого периода урвнмерных наблюдений ($T = 6.48 \text{ м}^2/\text{сут.}$).

Для контроля инерционных свойств системы “пласт–скважина” необходима периодическая проверка диапазона периодов проявления неустойчивого барометрического отклика по мере пополнения базы данных режимных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Багмет А.А., Багмет М.И., Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Малугин В.А., Рукавишников Т.А., Савин И.В. Исследование земнопоривных колебаний уровня подземных вод на скважине “Обнинск” // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 11. С. 84–95.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 112–119.
- Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.

- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
- Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М.* Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75–83.
- Любушин А.А.* Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука. 2007. 228 с.
- Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А., Казанцева О.С.* Мониторинг приливных вариаций уровня подземных вод в группе водоносных горизонтов // Физика Земли. 1997. № 4. С. 52–64.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
- Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J.* Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824–1832.
- Rice J.R., Cleary M.P.* Some basic stress-diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents // Rev. Geophys. Space Phys. 1976. V. 14. P. 227–241.
- Roeloffs E. A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
- Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 13619–13634.
- Rojstaczer S., Agnew D.S.* The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403–12411.
- Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719–8721.