

ОЦЕНКА ПОРОУПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА)

© 2006 г. Г. Н. Копылова¹, С. В. Болдина²

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

²Камчатский государственный университет, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 25.11.2204 г.

По данным синхронных наблюдений за уровнем воды и атмосферным давлением в скважине ЮЗ-5, Камчатка, оцениваются величины барометрической эффективности и приливной деформометрической чувствительности системы скважина-резервуар. Показано, что для скважины ЮЗ-5 может приниматься гипотеза о статически изолированном упругом отклике уровня воды на атмосферную и приливную нагрузку. На основе теории пороупругости рассчитываются пористость и параметры резервуара подземных вод: дренированная сжимаемость скелета водовмещающих пород, коэффициент порового давления (коэффициент Скемптона), модуль сдвига и упругая емкость резервуара. Рассматривается модель реакции уровня воды в скважине ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления в резервуаре.

ВВЕДЕНИЕ

Интерпретация данных уровнемерных наблюдений в скважинах для оценки изменения напряженно-деформированного состояния резервуаров подземных вод предполагает наличие двух видов физико-математических моделей: модели, описывающей реакцию порового давления на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара, и модели, описывающей реакцию уровня воды в скважине на изменение порового давления [17]. Такие модели разрабатываются на основе теории пороупругости, изложение которой дано в работах [8, 12, 14, 16]. Примеры приложения теории для описания поведения систем скважина – резервуар при изменении напряженно-деформированного состояния среды, вызванного земными приливами, атмосферной нагрузкой, крипповыми подвижками по разлому и сейсмическими воздействиями приводятся в [2, 7, 10, 11, 13, 15, 18–23].

В основе применения теории пороупругости для интерпретации уровнемерных данных лежит представление о резервуарах подземных вод как об относительно изолированных протяженных водонасыщенных пластах горных пород, сложенных пористыми упругими материалами. Такие природные объекты в изотермических условиях, при допущении их однородности и изотропности, могут быть описаны ограниченным набором физических (пороупругих) параметров [12, 16, 17, 23].

Линейная теория пороупругости включает систему уравнений, связывающих изменения деформации и напряжения в скелете породы с поро-

вым давлением с учетом сжимаемости скелета и упругого изменения объема жидкости. В удобной форме система уравнений пороупругости представлена в [9, 12, 16, 23]. В качестве основных констант этих уравнений в [15] принимаются: модуль сдвига G , дренированный ν и недренированный ν_u коэффициенты Пуассона, коэффициент порового давления (коэффициент Скемптона) B и коэффициент диффузии или коэффициент консолидации c (в отечественной литературе чаще употребляется термин пьезопроводность).

Уравнение связи деформаций и напряжений в твердой матрице с поровым давлением флюида для пороупругой среды дается как [16, 23]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\beta}{3} \left(\frac{1+\nu}{1-2\nu} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1-2\nu} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha \delta_{ij} p \right), \quad (1)$$

где ε_{ij} и σ_{ij} – макроскопические деформация и напряжение (считаются положительными для расширения), p – поровое давление (считается положительным для сжатия), δ_{ij} – символ Кронекера (при $i = j$, $\delta_{ij} = 1$, при $i \neq j$, $\delta_{ij} = 0$), σ_{kk} – сумма главных напряжений, $\sigma_{kk} = 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$.

Дренированная сжимаемость скелета β оценивается по формуле:

$$\beta = \frac{3(1-2\nu)}{2G(1+\nu)}. \quad (2)$$

Параметр α называется коэффициентом эффективного напряжения Био и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{3(v_u - v)}{B(1 - 2v)(1 + v_u)} \quad (3)$$

Коэффициент Скемптона B выражается из уравнения

$$p = -\frac{B\sigma_{kk}}{3}. \quad (4)$$

Коэффициент диффузии c равен

$$c = k \frac{B^2(1 - v)(1 - 2v)(1 + v_u)^2}{3\beta(1 + v)(1 - v_u)(v_u - v)}, \quad (5)$$

где k – коэффициент гидравлической проводимости среды (величина, эквивалентная коэффициенту фильтрации).

Пределы изменения параметров v , v_u и B : $v \leq v_u \leq 0.5$; $0 \leq B \leq 1$.

В приведенных выражениях для деформаций, напряжений и порового давления речь идет только о вариациях этих величин.

Для создания полной системы уравнений, описывающей поведение пороупругой среды, также необходимы:

– уравнение равновесия между массовыми силами F_i и напряжением в твердом скелете

$$\sigma_{ij} = -F_i, \quad (6)$$

– закон Дарси, связывающий скорость фильтрации флюида q_i и изменение порового давления

$$q_i = -kp_i. \quad (7)$$

Если течением жидкости в резервуаре можно пренебречь, то изменение в нем порового давления Δp определяется уравнением [16, 17]

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1 + v_u)/(1 - 2v_u)]\Delta\epsilon, \quad (8)$$

где $\Delta\epsilon$ – приращение объемной деформации резервуара (расширение – положительное).

Отсюда следует возможность использования вариаций уровня воды Δh для контроля деформации на основании предположения о том, что изменение порового давления в резервуаре зависит от изменяющегося в пространстве и во времени поля деформаций, но не от природы источника деформаций. Соответственно, оценка коэффициента в (8), например, по приливным вариациям уровня, будет управлять откликом порового давления на тектоническую деформацию и будет проявляться в изменениях уровня воды в скважине:

$$\Delta h = \Delta p / \rho g,$$

где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Это соотношение справедливо при отно-

сительно медленных изменениях порового давления, когда эффекты течения жидкости в ствол и из ствола скважины можно не учитывать.

Атмосферное давление в земные приливы являются постоянно действующими природными сигналами, изменяющими напряженно-деформированное состояние резервуаров подземных вод. По реакции уровня воды в скважине на атмосферное давление оценивается величина барометрической эффективности E_b [13, 15, 17, 19, 21–24]

$$E_b = -\frac{dh'_w}{dh_b},$$

где dh'_w – барометрическое изменение уровня воды, которое определяется разностью между воздействием атмосферного давления на открытую поверхность воды в скважине и изменением порового давления в резервуаре, вызванным поверхностной нагрузкой атмосферного давления на резервуар через перекрывающую толщу пород; dh_b – изменение атмосферного давления, выраженного в величинах, эквивалентных изменениям столба воды. Величина E_b определяется упругими свойствами и пористостью резервуара подземных вод, а также степенью его изоляции от атмосферы [21, 23]. Для условий квазистатического изолированно-барометрического отклика уровня воды величина E_b связана с коэффициентом порового давления B и коэффициентом Пуассона ν_d как [23]

$$E_b = 1 - 2B(1 + \nu_d)/3.$$

По реакции уровня воды в скважине на земные приливы оценивается величина приливной деформетрической чувствительности A_s [13, 17–19, 22–23]:

$$A_s = -\frac{dh_t}{\epsilon_t},$$

где dh_t – амплитуда приливных изменений уровня воды, ϵ_t – приливная объемная деформация. Величина A_s характеризует способность порового давления откликаться на изменение эффективно-напряжения в скелете и определяется пористостью и сжимаемостью пород резервуара.

Наблюдательные системы скважина – резервуар обладают индивидуальными свойствами, имеющими существенное влияние на формирование отклика уровня воды на изменение давления в резервуаре [17, 19]. Для описания индивидуальных свойств таких систем используются следующие параметры:

а) параметры, характеризующие упругие свойства резервуара подземных вод: сжимаемость порового флюида β_f , недреннированная (при условии постоянства массы флюида) сжимаемость твердой фазы скелета β_u , дренированная (при условии

Таблица 1. Характеристика скважины ЮЗ-5

Скважина, абс. отм. м	Координаты, град		Глубина, м	Открытый интервал, м	Уровень, м	Состав пород	Возраст	Характеристика флюида	Система регистрации	Интервал регистрации	Период на- блюдений
	с.ш.	в.д.									
ЮЗ-5 70 м	53.17	158.41	800	310–800	1.5	алевро- литы	К ₂	холодный пресный	Кедр А2	10 мин	26.05.2003– 05.11.2003

постоянства порового давления) сжимаемость скелета с учетом пор β , коэффициент Скемптона B , удельная упругая емкость резервуара S_s , модуль сдвига G ;

б) параметры, характеризующие фильтрационные свойства пород резервуара: пористость ϕ и коэффициент фильтрации k ;

в) параметры, характеризующие геометрию наблюдательной скважины: r_w – радиус скважины в районе фильтра, r_c – радиус скважины в ее верхней части, где происходят колебания уровня, A_w – площадь фильтра.

По данным уровнемерных наблюдений, включающих синхронное измерение уровня и атмосферного давления, оцениваются величины E_b и A_s . По этим величинам и с использованием табличных значений сжимаемости жидкости β_f и непроницаемой сжимаемости породообразующих минералов β_u могут оцениваться величины пороупругих параметров резервуара для квазистатических изолированных условий [13, 18–24]:

$$\beta = \frac{1 - E_B}{E_B} \left(\frac{3}{2\rho g A_s (1 + \nu)} - \beta_u \right), \quad (9)$$

$$B = \frac{\rho g A_s \beta}{1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)}, \quad (10)$$

$$G = \frac{3(1 - 2\nu)}{2\beta(1 + \nu)}, \quad (11)$$

$$S_s = \rho g (\beta + \phi \beta_f), \quad (12)$$

$$\phi = \frac{(\beta - \beta_u)(1 - B)}{B(\beta_f - \beta_u)}. \quad (13)$$

Наличие потоков воды в резервуаре, эффекты течения воды в скважину и из скважины при изменениях порового давления и атмосферной нагрузки, а также специфические особенности свойств резервуара, например, наличие газовой фазы в поровом флюиде, могут вносить искажения в оцениваемые величины упругих параметров по (9)–(13). Возможность применения указанных формул требует предварительного обоснования статически изолированных условий в резервуаре и оценку роли эффектов течения воды в скважину и из скважины [21, 23].

В настоящей работе проводится оценка параметров барометрического и приливного откликов по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, определение упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, построение модельной зависимости реакции уровня воды на периодические изменения порового давления в резервуаре.

Характеристика данных наблюдений. Скважина ЮЗ-5 расположена на Восточном побережье Камчатки на удалении 15 км от Авачинского залива. В табл. 1 приводится ее краткая характеристика [4, 5].

Скважина ЮЗ-5 (глубина 800 м) обсажена металлической колонной до глубины 310 м. В интервале глубин 0–62 м диаметр обсадки составляет 245 мм; в диапазоне 62–310 м диаметр обсадки – 168 мм. Ниже до забоя обсадка отсутствует. Интервал глубин 310–800 м представляет дренаж, через которую скважина связана с резервуаром подземных вод. Здесь вскрыты неравномерные по водообильности туфоалевролиты и филлитовидные сланцы верхнемелового возраста. Суммарная мощность зон водопритока, приуроченных к прослоям трещиноватых алевролитов, составляет 100 м. Скважиной вскрыты холодные пресные подземные воды. Уровень воды в скважине находится в 0.5–1.0 м ниже поверхности земли.

По данным откачки удельный дебит скважины Q составил 0.00148 м³/с при понижении уровня воды $S = 17.55$ м. Оценка величины коэффициента водопроницаемости резервуара $T = kd$ (k – коэффициент фильтрации в законе Дарси (7), d – вскрытая мощность резервуара) проводилась по модели линейного стока для неограниченного [3, с. 93]:

$$S = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\lambda d}{r_w}, \quad (14)$$

где λ – эмпирический коэффициент, равный ≈ 0.7 ; r_w – радиус скважины в области связи с резервуаром ($r_w = 0.084$ м). Величина d принималась равной суммарной мощности зон водопритоков в трещиноватых алевролитах (100 м). По (14) величина $T = 9 \times 10^{-2}$ м²/с. Отсюда величина $k = 9 \times 10^{-7}$ м/с.

Наблюдения на скважине ЮЗ-5 проводятся КОМСП ГС РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня и атмосферного давления Кедр А2 (ООО Полином, г. Хабаровск).

Интервал регистрации – 10 мин. Точность регистрации уровня составляла 0.1 см, атмосферного давления – 0.2 мбар. В работе рассматриваются данные наблюдений с 26.05.2003 г. по 05.11.2003 г. (рис. 1).

В изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 присутствуют низкочастотный тренд, барометрические и приливные вариации (рис. 1). Тренд уровня воды связан с сезонным характером питания и расходования подземных вод верхнемеловых отложений. Кратковременные повышения уровня с амплитудами до 2 см после выпадения осадков не менее 10–20 мм/сут вызваны увеличением поверхностной нагрузки на кровлю резервуара. В высокочастотных изменениях уровня воды присутствуют приливные вариации с амплитудами до 8 см и шумовые эффекты, связанные с режимом выпадения осадков.

В районе скважины амплитуды суточных изменений приливной деформации оценивались по теории статических приливов и составляют $(3–5) \times 10^{-8}$ [1, 6].

Оценка барометрического отклика уровня воды. Барометрическая эффективность E_b оценивалась методом кросс-спектрального анализа по амплитудным частотным передаточным функциям (АЧПФ) от вариаций атмосферного давления $X(t)$ к изменениям уровня воды $Y(t)$ [15, 21, 22]. При этом временной ряд среднечасовых значений уровня – в качестве выходного сигнала $Y(t)$.

Построение АЧПФ $A(f)$ включало последовательные процедуры: 1) построение усредненных кросс-периодограмм $S_{yx}(f)$ рядов $X(f)$ и $Y(f)$ для временных окон заданной длины; 2) непараметрическую оценку АЧПФ с заданным радиусом окна частотного усреднения периодограмм: $A(f) = S_{yx}(f)/S_{xx}(f)$, где $S_{xx}(f)$ – спектр мощности атмосферного давления. Перед осуществлением процедуры (1) производился переход к рядам $Y(t)$ и $X(t)$ в приращениях и фильтрация частотных полос в диапазонах периодов 11–13 и 23–27 ч для подавления интенсивных низкочастотных составляющих и удаления узкополосных суточных и полусуточных сигналов, искажающих барометрический отклик.

Амплитудная частотная передаточная функция (рис. 2) характеризует изменение барометрической эффективности в зависимости от периода вариаций. Наблюдается увеличение величины E_b в диапазоне периодов 2–6 ч от 0.2 до 0.37 см/мбар. На периоде 6 ч достигается максимальная величина $E_b = 0.37$ см/мбар, которая остается постоянной на периодах до суток – первых десятков су-

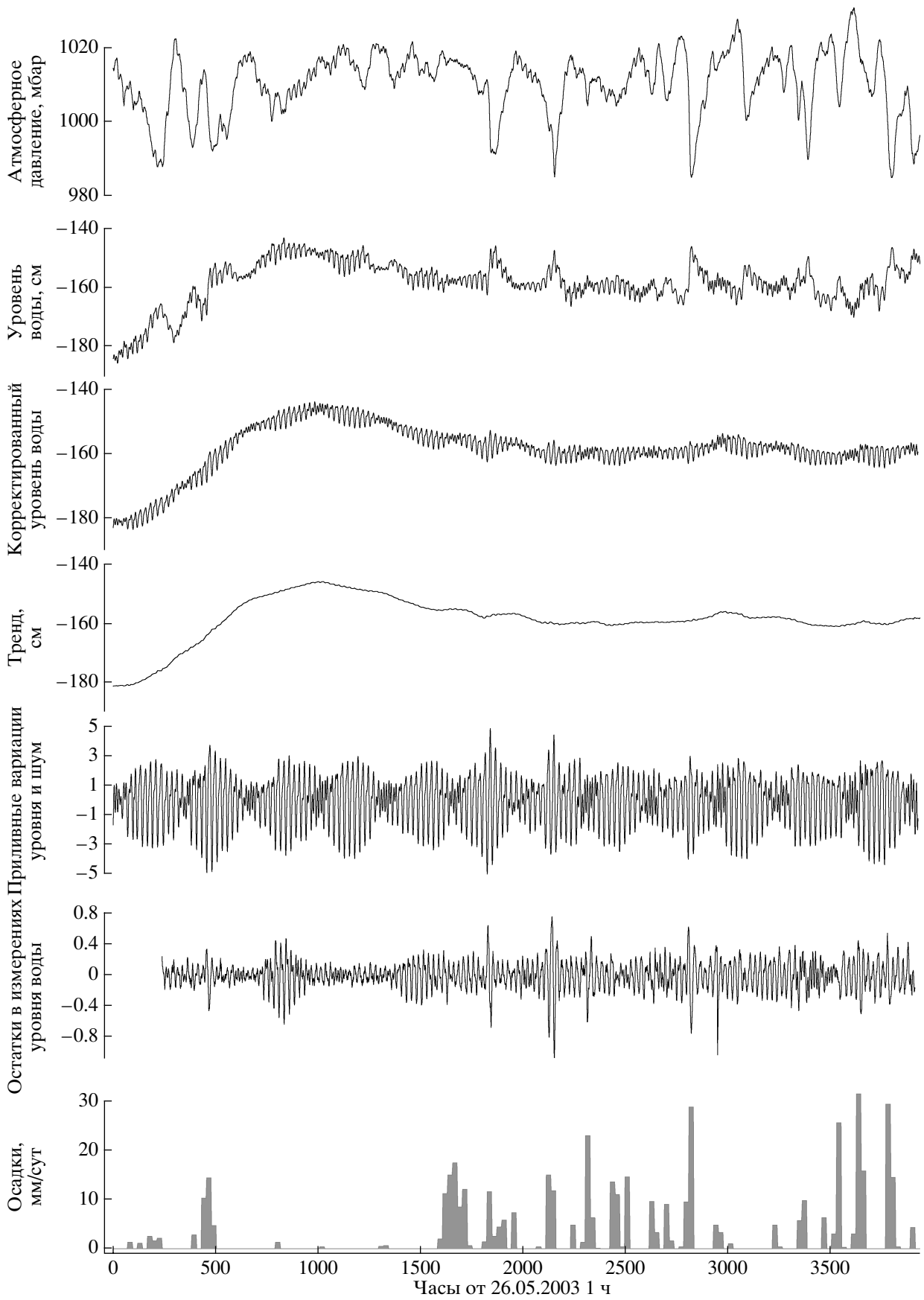
ток. Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления составляет $180^\circ \pm 10^\circ$ во всем рассматриваемом диапазоне периодов. Это указывает на хорошую изоляцию резервуара перекрывающими породами и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод, искажающих барометрический отклик [15, 17, 18–23]. Частотная зависимость барометрического отклика на периодах 2–6 ч обусловлена инерционными эффектами течения воды в скважину и из скважины [17, 22–23], а также, возможно, нестационарностью процесса формирования барометрического отклика в высокочастотной области.

Оценка приливного отклика уровня воды. На рис. 3, а приводится периодограмма вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне приливных периодов 11–27 ч. В изменениях уровня воды выделяются волны S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 [6, 25] с амплитудами 1.4–0.2 см.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды – амплитуд, амплитудных факторов (эквивалентных величинам A_s), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и соответствующей фазой приливного потенциала для отдельных волн, производилась с использованием программы ETERNA 3.0 [25]. Результаты анализа представлены в табл. 2. Величины приливных параметров по наиболее мощной волне P_1S_1 (ее период составляет 24 ч) не учитывались из-за зашумленности вариаций уровня воды действием метеофакторов на суточном периоде. Жирным шрифтом обозначены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум не менее 10. Это указывает на достаточно надежное определение приливных параметров по уровнемерным данным для выделенных волн. Диапазон изменения амплитудных факторов для них составляет 0.088–0.15 см/10⁻⁹. Различия в величинах A_s для отдельных волн могут быть вызваны особенностями формирования приливного отклика в различных частотных диапазонах, а также искажениями приливных амплитуд в изменениях уровня воды при воздействии океанического прилива, в котором присутствуют волны, имеющие такие же периоды, но отличающиеся по фазе.

На рис. 3, б приводится соотношение между амплитудами приливных волн в изменениях уровня воды и теоретическими амплитудами деформации по модели приливного потенциала STED [25]. Наблюдается линейная связь между этими величинами при значении коэффициента детерминации 0.93. Наличие сдвига линейной зависимости относительно нуля показывает, что оцененные

Рис. 1. Среднечасовые данные наблюдений за атмосферным давлением и уровнем воды, скважина ЮЗ-5, 26.05.2003 г. – 05.11.2003 г., в сопоставлении с суточными осадками. Представлены также изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, выделенные тренд и высокочастотная составляющая в изменениях уровня воды, остаточные изменения уровня воды после компенсации барометрических и приливных вариаций по [25].



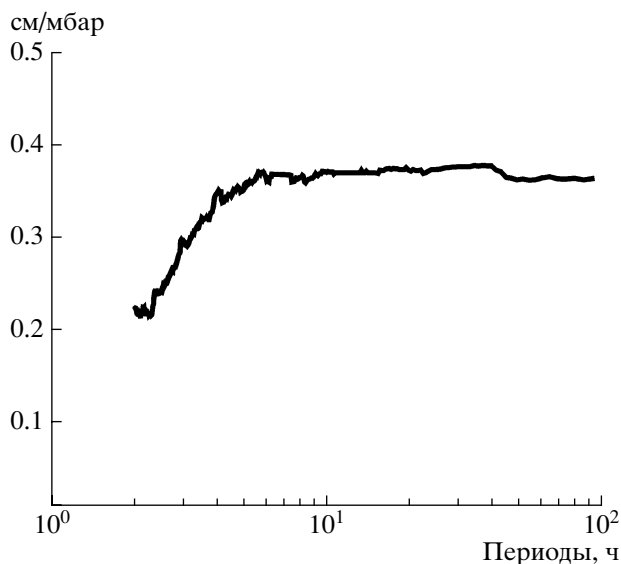


Рис. 2. Амплитудная частотная передаточная функция от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважине ЮЗ-5.

амплитуды приливных волн в изменениях уровня воды могли быть завышены на 0.09 см, что, вероятно, определяется средней амплитудой случайных шумовых вариаций уровня воды. Наклон линейной зависимости, связывающей выделенные амплитуды приливных изменений уровня и соответствующих величин объемной деформации, составляет $\approx 0.1 \text{ см}/10^{-9}$. Эта величина представляется наиболее приемлемой в качестве характеристики деформометрической чувствительности

вариаций уровня воды A_s во всем диапазоне приливных периодов для скважины ЮЗ-5.

Полученные оценки барометрического и приливного откликов уровня воды позволяют сопоставлять скважину ЮЗ-5 с другими скважинами с известными характеристиками соответствующих откликов. В качестве наблюдательных систем – аналогов скважины ЮЗ-5 могут рассматриваться скважина Бычиха, Хабаровский край: $E_b = 0.57$, $A_s = 0.147\text{--}0.159 \text{ см}/10^{-9}$ [7]; 500-метровая скважина в районе станции Какамура (КМК), Япония, $E_b = 0.57$, $A_s = 0.27 \text{ см}/10^{-9}$ [13]; скважина “Обнинск”, Калужская область, $E_b = 0.46$ [1, 2].

Определение упругих свойств и пористости резервуара подземных вод. Оценка пористости и сжимаемости резервуаров подземных вод для квазистатических изолированных условий может производиться на основе изучения откликов уровня воды в скважине на земные приливы и на атмосферное давление по (9)–(13).

Известно, что наблюдательная система скважина-резервуар представляет механический фильтр низких частот по отношению к изменениям напряженно-деформированного состояния резервуара [2]. Пропускная способность механического фильтра в диапазоне периодов от менее секунды до минут – часов – суток зависит от фильтрационных и упругих свойств водонасыщенных пород, слагающих резервуар; геометрических особенностей скважины, а также от степени совершенства связи скважины и резервуара. Для относительно высокочастотных возмущений и при хороших фильтрационных свойствах водонасыщенных пород система скважи-

Таблица 2. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 [25]

Волна	Амплитуда, ед · 10^{-9} объемной деформации (нанострейны)	Амплитуда уровня воды, см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град
Q₁	2.10	0.32	13.2	0.150 ± 0.003	167.62 ± 0.18
O₁	10.97	1.30	54.5	0.118 ± 0.0005	173.61 ± 0.03
M ₁	0.86	0.16	6.5	0.179 ± 0.006	179.28 ± 0.37
P ₁ S ₁	15.43	1.09	45.7	0.070 ± 0.004	176.77 ± 0.025
J ₁	0.86	0.081	3.4	0.094 ± 0.008	169.92 ± 0.45
OO ₁	0.47	0.069	2.9	0.146 ± 0.010	-176.98 ± 0.55
2N ₂	0.31	0.039	4.3	0.125 ± 0.021	135.77 ± 1.23
N₂	1.95	0.27	29.9	0.139 ± 0.004	-163.83 ± 0.22
M ₂	10.18	0.89	98.8	0.088 ± 0.0007	-159.53 ± 0.04
L ₂	0.29	0.031	3.5	0.109 ± 0.020	-51.88 ± 1.14
S₂K₂	4.74	0.52	57.3	0.109 ± 0.001	-140.48 ± 0.081
M ₃	0.04	0.011	4.9	0.245 ± 0.147	-115.34 ± 8.42

Примечание. Жирным шрифтом обозначены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум не менее 10 (см. текст).

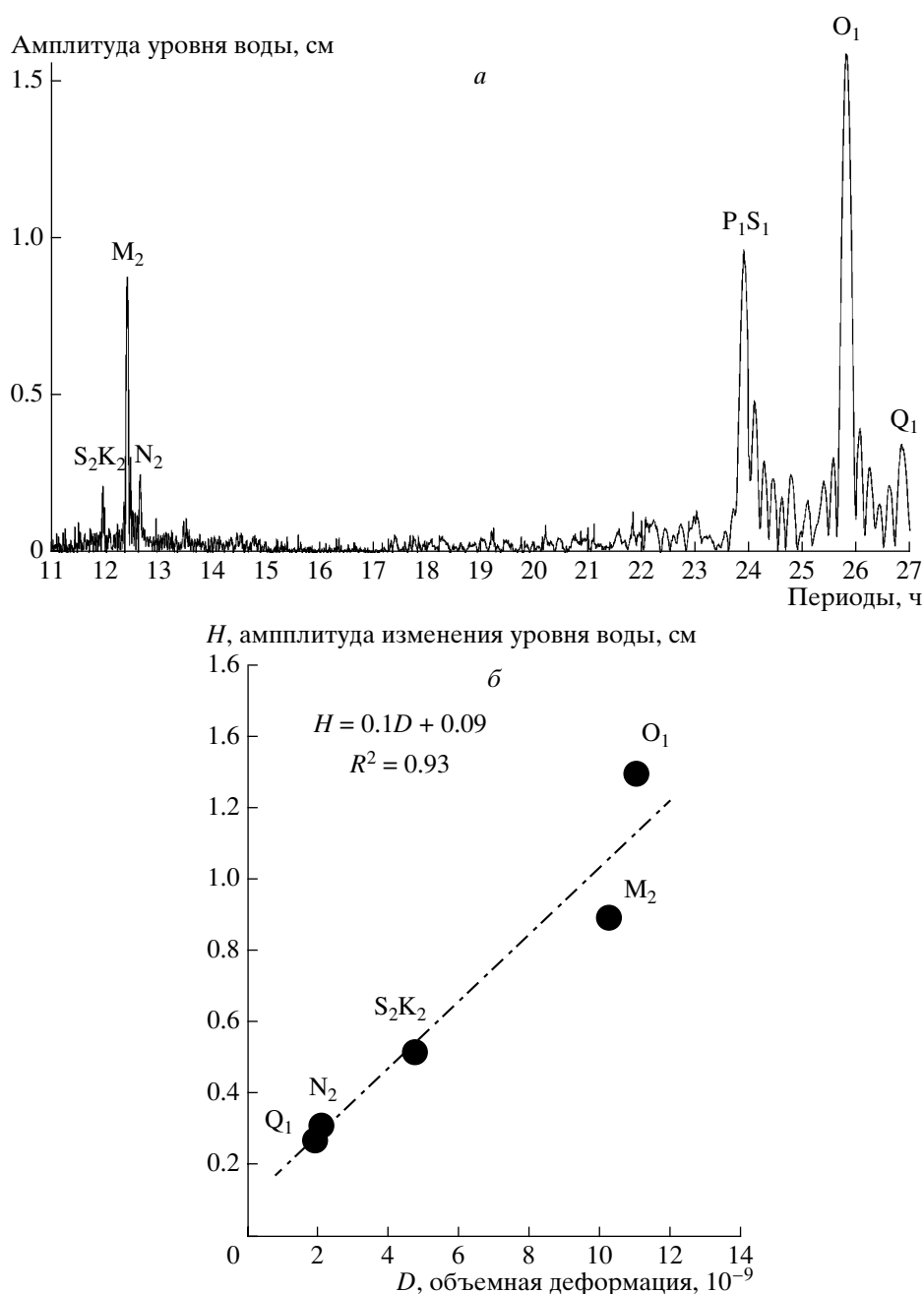


Рис. 3. Характеристика приливного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5: *a* – периодограмма вариаций уровня воды в приливном диапазоне 11–27 ч; *b* – зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин теоретической приливной деформации (табл. 2).

на-резервуар может иметь амплитудную характеристику резонансного типа. Периоды колебаний, где могут ожидать резонансные пики, имеют порядок нескольких секунд – десятков секунд [10].

Ослабление отклика уровня воды в области высокочастотных изменений порового давления, вызванных приливыми и сейсмическими возмущениями, происходит, в основном, из-за течения жидкости в ствол скважины и из него. Кроме этого, природные резервуары подземных вод обыч-

но более или менее несовершенно изолированы. В [22] показано, что степень изоляции напорного резервуара перекрывающими породами от грунтовых вод можно оценить по изменениям барометрического отклика в зависимости от частоты. При ослаблении барометрического отклика в области суточных периодов предполагается наличие вертикального потока через перекрывающую толщу и влияние вариаций уровня грунтовых вод на изменения порового давления в резервуаре.

Таблица 3. Оценки диапазона изменения упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, скважина ЮЗ-5, при $\beta_u = 0$

Волны	Барометрическая эффективность E_b , см/мбар	Деформометрическая чувствительность 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 резервуара S_s , м ⁻¹ × 10 ⁻⁷	Пористость ϕ
N ₂	0.37	0.13	<16.0	>0.37	>0.67	<23.4	<0.17
M ₂	0.37	0.088	<23.7	>0.25	>0.67	<34.5	<0.26
O ₁	0.37	0.118	<17.6	>0.34	>0.67	<25.8	<0.19
Q ₁	0.37	0.150	<13.9	>0.43	>0.67	<20.2	<0.15
	0.37	0.1*	<20.8*	>0.29*	>0.67*	<30.4*	<0.23*

Примечание. * – характерное значение для диапазона приливных периодов (рис. 3, б).

Таблица 4. Оценка упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, скважина ЮЗ-5, при $\beta_u = 0.3 \times 10^{-10}$ Па⁻¹ (кварц)

Волны	Барометрическая эффективность E_b , см/мбар	Деформометрическая чувствительность 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 резервуара S_s , м ⁻¹ × 10 ⁻⁷	Пористость ϕ
N ₂	0.37	0.13	10.9	0.54	0.69	14.4	0.09
M ₂	0.37	0.088	18.5	0.32	0.68	25.8	0.18
O ₁	0.37	0.118	12.5	0.48	0.69	16.8	0.10
Q ₁	0.37	0.150	8.8	0.68	0.69	11.3	0.06
	0.37	0.1*	13.8*	0.43*	0.68*	18.7*	0.12*

Примечание. * – характерное значение для всего диапазона приливных периодов.

Уровень воды в скважине ЮЗ-5 имеет постоянный барометрический отклик и фазу 180° на периодах более 6 ч. В суточном диапазоне вариаций ослабление барометрического отклика не наблюдается, что указывает на хорошую изоляцию резервуара от грунтовых вод и на отсутствие в нем значимых вертикальных течений. Поэтому величина $E_b = 0.37$ является представительной статически изолированной барометрической эффективностью для этой скважины [21]. В диапазоне приливных периодов ослабление барометрического отклика не наблюдается (рис. 2). Это указывает на регистрацию неискаженного отклика порового давления на приливные деформации резервуара по равномерным данным.

Так как величина недренированной сжимаемости твердой фазы скелета β_u неизвестна, то, принимая $\beta_u = 0$, по формулам (9)–(13) можно получить верхние пределы дренированной сжимаемости скелета β , пористости ϕ , удельной упругой емкости S_s и нижние пределы коэффициента Скемптона B и модуля сдвига G для резервуара, вскрытого скважиной ЮЗ-5 (табл. 3). В расчетах принимались следующие величины: сжимаемость

жидкости $\beta_f = 4.4 \times 10^{-10}$ Па⁻¹, плотность воды $\rho = 1.0 \times 10^{-3}$ кг/м³, ускорение силы тяжести $g = 9.8$ м/с², дренированный коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$ и недренированный коэффициент Пуассона $\nu_u = 0.3$.

Если принять величину сжимаемости твердой фазы скелета, равной величине недренированной сжимаемости кварца $\beta_d = 0.3 \times 10^{-10}$ Па⁻¹ [20], то можно получить приблизительные оценки пористости и упругих параметров резервуара (табл. 4). Оценочный характер полученных величин следует, например, из некоторого различия величин параметров, определяемых для различных приливных волн. Однако сравнение полученных величин β , G , B , S_s и ϕ с величинами пороупругих параметров для резервуаров, вскрытых скважинами-аналогами, указывает на их примерное соответствие. Кроме этого, сравнение полученных величин с данными петрофизических исследований пород и расчетами, выполненными авторами работы [24] для резервуаров, сложенных песчаниками, показывает, что величины упругих параметров и пористости из табл. 4 согласуются с данным из [24].

Реакция уровня воды в скважине ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления. Приливные деформации не вызывают течение воды в совершенно изолированных резервуарах подземных вод, так как большой пространственный радиус действия земных приливов предполагает отсутствие горизонтальных градиентов порового давления. Кроме этого, при совершенной изоляции резервуара слабопроницаемыми породами вертикальное течение подземных вод исключается. В этом случае для любого периодического (сейсмического, приливного) возмущения порового давления с амплитудой p_0 на достаточно длинных периодах, таких, чтобы временем, необходимым для течения воды в ствол и из ствола скважины, можно было пренебречь, уровень воды в скважине x_0 отслеживает напор в резервуаре h_0 как

$$x_0 = p_0/\rho g = h_0, \quad (15)$$

где ρ – плотность жидкости, g – гравитационное ускорение.

Рассмотрим ситуацию с периодически изменяющимся поровым давлением в резервуаре. На достаточно коротких периодах колебаний порового давления существенным является время, необходимое для течения жидкости в ствол и из ствола скважины. На таких периодах пиковое изменение уровня воды будет меньше, чем по (15), и будет запаздывать по отношению к пику напора в резервуаре h_0 . Для этой ситуации выражения для зависимости x_0/h_0 приведены в [11]. Если силами инерции в столбе воды в скважине пренебрегается, то амплитудное соотношение (соотношение между амплитудой изменений уровня воды в скважине пренебрегается, то амплитудное соотношение (соотношение между амплитудой изменений уровня воды в скважине и амплитудой изменения гидростатического напора в резервуаре) определяется как

$$A = x_0/h_0 = (E^2 + F^2)^{1/2}, \quad (16)$$

а фазовый сдвиг определяется как

$$\eta = \arg(x_0/h_0) = \arctg(F/E). \quad (17)$$

При этом

$$E = 1 - \beta_w(\psi \text{Ker}\alpha_w + \phi_w \text{Kei}\alpha_w), \quad (18)$$

$$F = \beta_w(\phi_w \text{Ker}\alpha_w - \psi \text{Kei}\alpha_w), \quad (19)$$

$$\phi_w = \frac{-(\text{Ker}_1\alpha_w + \text{Kei}_1\alpha_w)}{2^{1/2}\alpha_w(\text{Ker}_1^2\alpha_w + \text{Kei}_1^2\alpha_w)}, \quad (20)$$

$$\psi = \frac{-(\text{Ker}_1\alpha_w - \text{Kei}_1\alpha_w)}{2^{1/2}\alpha_w(\text{Ker}_1^2\alpha_w + \text{Kei}_1^2\alpha_w)}, \quad (21)$$

$$\alpha_w = r_w(\omega S_s/T)^{1/2}, \quad (22)$$

$$\beta_w = \pi\omega r_c^2 r_w/(A_w T), \quad (23)$$

где $\omega = 2\pi/\tau$ – частота волны, τ – период волны.

В (18) – (23) $\text{Ker}\alpha_w$, $\text{Kei}\alpha_w$ и $\text{Ker}_1\alpha_w$, $\text{Kei}_1\alpha_w$ представляют действительную и мнимую части функции Кельвина нулевого и первого порядка (модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого и первого порядка), α_w и β_w – безразмерные функции частоты, выраженные через параметры резервуара и геометрические параметры скважины: r_w – радиус скважины в области ее связи с резервуаром, r_c – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня волны, A_w – площадь, через которую скважина связана с резервуаром (площадь фильтра); S_s – удельная упругая емкость и T – коэффициент водопроницаемости.

Таким образом, искажение амплитуды изменения уровня по отношению к периодическим изменениям порового давления зависит от коэффициента водопроницаемости T , удельной упругой емкости S_s , геометрических параметров скважины и инерционных эффектов водообмена между скважиной и резервуаром η .

Оценим величину искажений отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменения порового давления, используя данные из табл. 4. По (12) величина удельной упругой емкости составляет порядка $S_s = 18.7 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ ($11.3\text{--}25.8 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$). При радиусах скважины $r_w = 0.084 \text{ м}$ и $r_c = 0.123 \text{ м}$, суммарной мощности зон водопритока в трещиноватых туфоалевролитах $d = 100 \text{ м}$, площади $A_w = 3 \text{ м}^2$ и заданных величинах коэффициента фильтрации k от 2×10^{-9} до $2 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ [24] получаем оценку для параметра T/r_w^2 в интервале от $2.8 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. По данным откачки величина T/r_w^2 составляет $1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и находится в рассматриваемом диапазоне значений. Графики амплитудного соотношения A и сдвига фаз η при различных значениях T/r_w^2 и $S_s r_w^2/r_c$ представлены на рис. 4.

При $k = 2 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ или $T/r_w^2 = 2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ на периодах $< 1 \text{ с}$ скважина работает как низкочастотный фильтр (амплитудное соотношение A менее 0.2). На периодах от 1 с до часа величина A возрастает, но не достигает единицы. На периодах более часа амплитудное соотношение практически равно единице. При определенных соотношениях параметров резервуара и скважины на периодах поверхностных сейсмических волн Рэлея ($> 1\text{--}30 \text{ с}$) амплитудное соотношение из-за резонанса может возрасти до нескольких сотен [10]. В нашем случае резонансное увеличение амплитудного соотношения не наблюдается.

На длинных периодах, соответствующих приливным воздействиям, величина A приближается к 1, поэтому в этом диапазоне искажение отклика

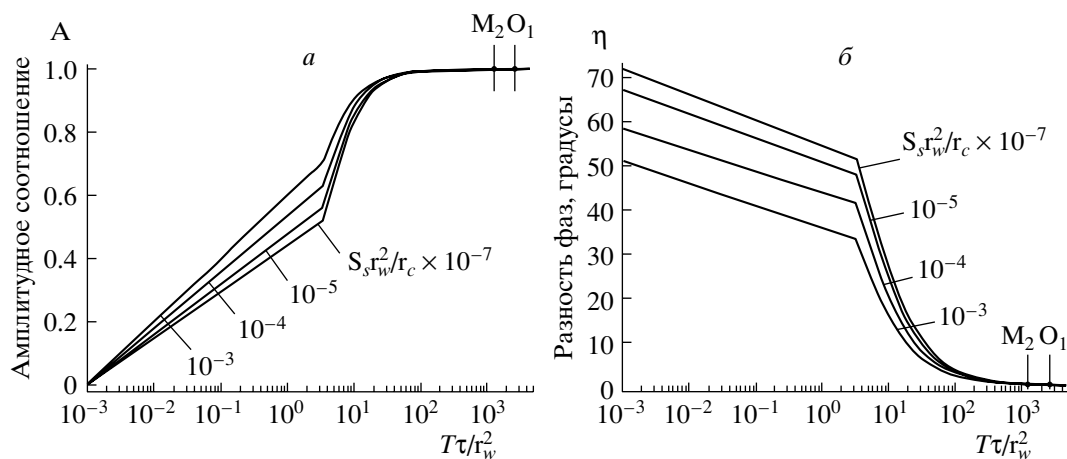


Рис. 4. Графики изменений сдвига при различных значениях $T\tau/r_w^2$ и $S_s r_w^2/r_c$ для: *а* – амплитудного соотношения между изменениями уровня воды и напора в резервуаре; *б* – фазового запаздывания.

уровня воды на изменение отклика уровня воды на изменение порового давления не ожидается. Фазовое искажение на малых периодах ($\tau \leq 1$ с) достигает 74° , а на длинных периодах сдвига фаз между вариациями гидростатического напора в резервуаре и вариациями уровня воды практически нет ($\eta \approx 0^\circ$) (рис. 4, б).

На приливных периодах $\tau \approx 12\text{--}27$ ч величина амплитудного соотношения x_0/h_0 равна 1 при величинах параметра $T\tau/r_w^2$ более 10^3 (рис. 4, а), а теоретическое фазовое запаздывание x_0 по отношению к h_0 не превышает одного градуса (рис. 4, б). Для периодов приливных волн M_2 ($\tau \approx 12.42$ ч) ($\tau \approx 25.82$ ч) параметр $T\tau/r_w^2$ больше 1000 (для волны M_2 параметр $T\tau/r_w^2$ равен примерно 1000, а для волны O_1 – примерно 3000) (рис. 4). Следует отметить, что использование величины коэффициента фильтрации k в диапазоне $2 \times 10^{-6}\text{--}2 \times 10^{-9}$ м/с не приводит к существенному изменению амплитудного и фазового соотношения в диапазоне приливных периодов.

Таким образом, полученная зависимость амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 и изменениями порового давления служит косвенным подтверждением правильности приведенных оценок пороупругих параметров резервуара на относительно длинных периодах (табл. 4).

Если подставить в (8) величины теоретической приливной деформации для отдельных волн (табл. 2), вычисленные величины коэффициента Скемптона B , модуля сдвига G (табл. 4) и принятую величину недренированного коэффициента Пуассона $\nu_u = 0.3$, то можно получить ожидаемые амплитуды приливных вариаций порового давле-

ния Δp в резервуаре скважины ЮЗ-5. Перевод величин Δp в эквивалентные амплитуды изменения уровня воды Δh показывает, что для волны M_2 ожидается теоретическая амплитуда изменения уровня 0.49 см, O_1 – 0.8 см, Q_1 – 0.21 см и N_2 – 0.16 см. Расчетные величины по (8) меньше на 0.11–0.5 см соответствующих амплитуд, полученных из приливного анализа (табл. 2). Такое несоответствие можно объяснить, во-первых, тем, что фактические величины приливных деформаций в области резервуара неизвестны. Для этого необходимо провести приливные деформометрические измерения непосредственно в районе скважины ЮЗ-5. Во-вторых, в результатах приливного анализа равномерных данных не учитывается нагрузка от океанического прилива, которая может искажать величины выделенных амплитуд приливных волн [13].

На рис. 1 представлены изменения остатков в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 после компенсации барометрического и теоретического приливного воздействий по алгоритму [25]. Поведение остатков в изменениях уровня воды имеет квазигармонический характер с выраженными суточным и полусуточным максимумами. Суточные амплитуды вариаций остатков изменяются от 0.2–0.4 см до 1.0–1.7 см при величине стандартного отклонения для всего ряда ± 0.18 см. Наличие остатков в изменениях уровня воды после компенсации основанных факторов-помех – атмосферного давления и земноприливного воздействия, обусловлены шумовыми эффектами в регистрации уровня воды и атмосферного давления, в частности, температурными наводками на регистрирующую аппаратуру; постоянным воздействием океанической нагрузки, эпизодическим нагружающим воздействием атмосферных осадков на кровлю пласта, а также, по-видимому, несовершенством модели приливного деформи-

рования Земли применительно к конкретному району. Поведение остатков в изменениях уровня воды и их средние амплитуды позволяют оценивать качество данных регистрации уровня воды и атмосферного давления и степень адекватности модели приливного деформирования Земли для конкретного района.

Не более определенной является и правильность соответствия между теоретическим фазовым сдвигом η (менее 1°) и величинами разности фаз между расчетным земным приливом и изменениями уровня воды в скважине (табл. 2). В случае вскрытия скважиной изолированного резервуара, при отсутствии инерционных эффектов водообмена и без учета океанической нагрузки, разность фаз между приливной волной и изменением уровня воды должна составлять 180° . Отсюда можно оценить запаздывание для хорошо выделяемых волн (табл. 2). Q_1 (12°), O_1 (6°), N_2 (16°), M_2 (20°). Полученное несоответствие в 6° – 20° , скорее всего, связано с недоучетом влияния океанического прилива на изменение уровня воды в скважине ЮЗ-5, т.е. с несовершенством использованной теоретической модели приливного воздействия. Более точные оценки параметров резервуара, вскрытого скважиной ЮЗ-5, и построение адекватной модели отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара подземных вод могут быть получены при комплексировании уровнемерных и деформометрических наблюдений.

Выводы. 1. По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважине ЮЗ-5 исследован барометрический отклик и выполнена оценка величины барометрической эффективности E_b в диапазоне часовых-суточных периодов.

В диапазоне вариаций уровня воды и атмосферного давления от 6 ч до первых десятков суток величина E_b постоянна и равна 0.37 см/мбар при разности фаз 180° . Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в резервуаре, вскрытом скважиной ЮЗ-5.

2. На основании приливного анализа данных уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 (с использованием программы ETERNA 3.0) и величины ее барометрической эффективности оценены параметры резервуара – дренированная сжимаемость скелета водовмещающих пород, модуль сдвига, коэффициент Скемптона, удельная упругая емкость и пористость.

3. Построена модель изменений уровня воды в скважине ЮЗ-5 при периодических вариациях порового давления в резервуаре, вызванных объемными деформациями, в диапазоне периодов от менее секунды до десятков-сотен часов с учетом эффектов водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод. На периодах от часа до десятков-пер-

вых сотен часов, соответствующих диапазону действия приливных и медленных сеймотектонических вариаций напряженно-деформированного состояния среды, искажение отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменения порового давления не ожидается.

Уточнение параметров резервуара, вскрытого скважиной ЮЗ-5, и построение адекватной модели отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния среды может быть осуществлено при комплексировании уровнемерных и деформометрических наблюдений.

Авторы выражают благодарность д. ф.-м. н. А.А. Любушину (мл.) за предоставление программы кросс-спектрального анализа и д. г.-м. н. А.В. Кирюхину за содержательное обсуждение результатов настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др. Исследование земнопоривных колебаний уровня подземных вод на скважине "Обнинск" // Физика Земли. 1989. № 11. С. 84–95.
2. Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Калачев А.А., Савин И.В. Частотная характеристика системы скважина – водоносный горизонт по данным наблюдений за уровнем подземных вод // Физика Земли. 1988. № 3. С. 41–50.
3. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
4. Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69–79.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
6. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
7. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Корчагин Ф.Г., Запирева Е.А. Мониторинг упругих параметров водонасыщенного пласта по наблюдениям уровня воды в скважинах // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 8. С. 840–850.
8. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. 1941. V. 12. P. 155–164.
9. Cheng A.N.-D., Detournay E. A direct boundary element method for plane strain poroelasticity // Int. J. of Numer. Analytical Meth. Geomech. 1988. № 12. P. 551–572.
10. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennett R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915–3926.
11. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824–1832.
12. Kumpel H.-J. Poroelasticity: parameters reviewed // Geophys. J. Int. 1991. V. 105. P. 783–799.

13. *Igarashi G., Wakita H.* Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № B3. P. 4269–4278.
14. *Nur A., Byerlee J.D.* An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 6414–6419.
15. *Quilty E.G., Roeloffs E.A.* Removal of barometric pressure response from water level data // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № B6. P. 10209–10218.
16. *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.
17. *Roeloffs E.A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // *Pure Appl. Geophys.* 1988. V. 126. P. 177–209.
18. *Roeloffs E.A., Burford S.S., Records A.W.* Hydrologic effects on water level changes associated with episodic fault creep near Parkfield, California // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 12387–12402.
19. *Roeloffs E.A.* Poroelastic methods in the study of earthquake-related hydrologic phenomena // *Advances in Geophysics. Academic, San Diego, Calif.*, 1996. P. 135–195.
20. *Roeloffs E.A.* Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 869–889.
21. *Rojstaczer S.* Determination of fluid flows properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading // *Water Resour. Res.* 1988. V. 24. P. 1927–1938.
22. *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.
23. *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.
24. *Van der Kamp G., Gale L.E.* Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // *Water Resour. Res.* 1983. V. 19. P. 538–544.
25. *Wenze H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // *BIM.* 1994. № 118. P. 8719–8721.

Estimation of Pore-Elastic Parameters for a Reservoir of Ground Water (based on water level observation at YuZ-5 well, Kamchatka)

G. N. Kopylova¹, S. V. Boldina²

¹ *Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

² *Kamchatka State University, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683032, Russia*

Synchronous observations of water level and air pressure at the YuZ-5 well, Kamchatka were used to estimate barometric efficiency and tidal strain sensitivity for the well-reservoir system. It is shown that the hypothesis of a statically isolated elastic response of water level to atmospheric and tidal loading can be adopted for the YuZ-5 well. The theory of pore elasticity was used to calculate porosity and parameters of the ground water reservoir: drain compressibility of the host rock framework, the coefficient of pore pressure (Skempton constant), the shear modulus, and the elastic capacity of the reservoir. We consider a model for the response of water level at the YuZ-5 well to periodic changes in the pore pressure of the reservoir.