

УДК 550.832.9:556.34.042

ОЦЕНКА ПОРОУПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Г. Н. Копылова^{1,2}, С. В. Болдина²

¹Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН

²Камчатский государственный педагогический университет

г. Петропавловск-Камчатский

Аннотация. В работе рассматривается возможность оценки пористости и упругих параметров резервуаров подземных вод по данным уровнемерных наблюдений в скважинах. По экспериментальным данным синхронных наблюдений за уровнем воды и атмосферным давлением в скважинах Е1 и ЮЗ-5, Камчатка, оцениваются величины барометрической эффективности и приливной деформометрической чувствительности. На основе теории пороупругости рассчитываются пористость и параметры резервуара скважины ЮЗ-5: дренированная и недренированная сжимаемости скелета, коэффициент Скемптона, модуль сдвига и упругая емкость резервуара. Рассматривается модель реакции уровня воды в скважине на периодические изменения порового давления в резервуаре.

THE ASSESMENT OF POROELASTIC PROPERTIES OF UNDERGROUND WATER RESERVOIRS ON DATA OF WATER LEVEL OBSERVATIONS

G. N. Kopylova^{1,2}, S. V. Boldina²

¹Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS

² Kamchatkan State Pedagogical University

Petropavlovsk-Kamchatsky

Abstract. The assessment of porosity and elastic parameters of underground water reservoirs are carried out on data of water level observations on wells E1 and UZ-5 on the base of theory of poroelasticity. The values of barometric efficiency and tidal strain sensitivity are evaluated on experimental data, and then drained and undrained matrix compressibilities, Skempton's coefficient; shear modulus and specific storage of reservoir are estimated. The behavior pattern of water level in the well UZ-5 by periodical variations of pore pressure is considered.

Введение

Интерпретация данных уровнемерных наблюдений для оценки изменения напряженно-деформированного состояния резервуаров подземных вод предполагает наличие двух видов физико-математических моделей: 1) модели, описывающей реакцию порового давления в резервуаре на изменение напряженно-деформированного состояния среды; 2) модели, описывающих реакцию уровня воды в скважине на изменение порового давления [16]. Такие модели разрабатываются на основе теории пороупругости, изложение которой дано в работах [15, 7, 11, 13]. Примеры приложения теории для

оценки свойств резервуаров и создания моделей поведения систем «скважина – резервуар» по уровнемерным данным приводятся в [2, 6, 9-10, 12, 14, 17-22].

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 [11, 15, 16].

Линейная теория пороупругости включает систему уравнений, в т.ч. уравнение связи напряжения с поровым давлением с учетом потоков жидкости и сжимаемости твердого скелета резервуара и уравнение сохранения массы жидкости с учетом градиентов порового давления и упругого изменения объема жидкости. В удобной форме система уравнений пороупругости представлена в [15, 11, 8]. В качестве основных констант этих уравнений принимаются: модуль сдвига G , дренированный ν и недренированный ν_u коэффициенты Пуассона, проницаемость резервуара c и коэффициент порового давления (коэффициент Скемптона) B . В качестве динамических переменных принимаются: полное напряжение σ_{ij} и поровое давление p , а в качестве кинематических переменных - деформация скелета e_{ij} , определяемая из вектора смещения u_{ij} , и изменение содержания жидкости в единице объема ζ . Уравнения, связывающие изменения этих величины записываются в виде:

$$\sigma_{ij} = 2Ge_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}e - \alpha\delta_{ij}p, \quad (1)$$

$$p = -\frac{2GB(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)}e + \frac{2GB^2(1-2\nu)(1+\nu_u)^2}{9(\nu_u-\nu)(1-2\nu_u)}\zeta, \quad (2)$$

где δ_{ij} - символ Кронекера (при $i = j$, $\delta_{ij}=1$, при $i \neq j$, $\delta_{ij}=0$).

Коэффициент Скемптона B выражается в виде $B = -\frac{3p}{\sigma_{kk}}$, где σ_{kk} - сумма главных напряжений. Пределы изменения параметров ν, ν_u и B : $\nu \leq \nu_u \leq 0.5$; $0 \leq B \leq 1$. Параметр α называется коэффициентом эффективного напряжения Био и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1-2\nu)(1+\nu_u)}. \quad (3)$$

В выражениях (1) – (2) для деформаций, напряжений и поровых давлений речь идет только о вариациях этих величин.

Для создания полной системы уравнений, описывающей поведение пороупругой среды, кроме уравнений (1) и (2), необходимы:

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

$$\sigma_{ij} = -F_i, \quad (4)$$

- закон Дарси, связывающий скорость фильтрации q_i и изменение порового давления

$$q_i = -kp_i, \quad (5)$$

где k - коэффициент гидравлической проводимости (коэффициент фильтрации), который выражается как $k = \frac{c}{\mu}$, где c - проницаемость резервуара, μ - динамическая вязкость жидкости;

- уравнение неразрывности для жидкой фазы

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + q_i = \gamma, \quad (6)$$

где γ - интенсивность объёмного поступления жидкости.

Таким образом, уравнения (1)-(2), (4)-(6), содержащие пять материальных констант - G, ν, ν_u, B, k , полностью описывают линейные пороупругие процессы в резервуаре, приводящие к вариациям порового давления.

Если течением жидкости в резервуаре можно пренебречь, то по [15, 16]

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)]\Delta \varepsilon. \quad (7)$$

где $\Delta \varepsilon$ - приращение объёмной деформации резервуара (расширение – положительное).

Отсюда следует возможность использования вариаций уровня воды Δh для контроля изменений деформации $\Delta \varepsilon$ на основании предположения о том, что изменение порового давления в резервуаре Δp зависит от изменяющегося в пространстве и во времени поля деформаций, но не от природы источника деформаций. Соответственно, оценка коэффициента в (7), например, по приливным вариациям уровня, будет управлять откликом порового давления на тектоническую деформацию и проявляться в изменениях уровня воды в скважине Δh :

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

где ρ - плотность воды, g - ускорение свободного падения. Следует отметить, что указанное соотношение справедливо при относительно медленных изменениях порового давления в резервуаре, когда эффекты течения жидкости в ствол и из ствола скважины можно не учитывать.

Атмосферное давление и земные приливы являются постоянно действующими природными сигналами, изменяющими напряженно-деформированное состояние резервуаров подземных вод. Реакция уровня воды в скважине на атмосферное давление оценивается по величине барометрической эффективности E_b [12, 14, 16, 18, 20-23]

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

где dh'_w - барометрическое изменение уровня воды в скважине, dh_b - изменение атмосферного давления, выраженного в величинах эквивалентных изменениям столба жидкости (например, 1 см водяного столба ≈ 10 Па ≈ 1 мбар).

Реакция уровня воды в скважине на земные приливы оценивается по величине приливной деформометрической чувствительности: A_s [12, 16-18, 21-22]:

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

где dh_t - амплитуда приливных изменений уровня воды, ε_t - приливная объёмная деформация.

Различные наблюдательные системы «скважина – резервуар» обладают индивидуальными свойствами, имеющими существенное влияние на формирование отклика уровня воды на изменения давления в резервуаре [16, 18]. Для описания индивидуальных свойств таких систем используются следующие параметры:

а - параметры, характеризующие упругие свойства резервуаров: сжимаемость твердой фазы скелета β_s , сжимаемость жидкости β_p , недrenированная сжимаемость скелета β_u , дренированная сжимаемость скелета β , удельная упругая емкость резервуара S_s ;

б - параметры, характеризующие фильтрационные свойства пород резервуара: пористость ϕ и гидравлическая проводимость резервуара k ;

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

По данным уровневых наблюдений, включающих синхронное измерение уровня и атмосферного давления, оцениваются величины E_b и A_s . На основании этих величин и с использованием табличных значений сжимаемостей жидкости β_f и породообразующих минералов β_s могут оцениваться величины пороупругих параметров резервуара для квазистатических изолированных условий, в частности: G , β , β_u , удельная упругая емкость резервуара S_s и пористость ϕ [6, 12, 17-21]:

$$G = \frac{A_s \rho g}{2E_b} \quad (8)$$

$$\beta_u = \frac{3(1-2\nu_u)}{2G(1+\nu_u)} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{1-E_B}{E_B} \left(\frac{3}{2\rho g A_s (1+\nu)} - \beta_u \right) \quad (10)$$

$$B = \frac{\rho g A_s \beta}{1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)} \quad (11)$$

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

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

Оцениваемые по формулам (8) – (13) параметры могут быть использованы для построения модельных зависимостей отклика уровня воды в скважине на изменения напряженно-деформированного состояния резервуара подземных вод.

В настоящей работе проводится оценка параметров барометрического и приливного откликов по данным уровневых наблюдений на скважинах Е1 и ЮЗ-5, определение упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, вскрытого скважиной ЮЗ-5, построение модельной зависимости реакции уровней воды в скважине ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления в резервуаре.

Наблюдательные скважины, оценка барометрического и приливного откликов уровней воды

Скважины ЮЗ-5 и Е1 расположены на Восточном побережье Камчатки на удалении 15-25 км от Авачинского залива. В таблице 1 приводится их краткая характеристика. Более подробная информация о геологическом разрезе, гидрогеологических условиях и о строении скважин дается в [3, 4].

Скважина Е1 обсажена на всю глубину 665 м металлической колонной диаметром 219 мм. В интервале 625-647 м установлен фильтр путем перфорации обсадной колонны с плотностью отверстий 12 штук на погонный метр. В области фильтра вскрыты слабобоводообильные туфы позднеэоценового возраста, содержащие минерализованные подземные воды с присутствием газа азотно-метанового состава. Уровень воды в скважине установился на глубине 28-29 м.

Скважина ЮЗ-5 (глубина 1001 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 310-1001 м представляет фильтр, через который 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. Диаметр

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин.

Скважина, а. о., м	Координаты, град		Глубина, м Фильтр, м	Уровень, м	Состав пород Возраст	Характеристика флюида	Система регистрации частота	Период наблюдений, дд.мм.гг
	с.ш.	в.д.						
Е-1 180 м	53.26	158.48	<u>665</u> 625-647	28	туфы N ₂	холодный, минерализ., газ N ₂ -CH ₄	Кедр А2 10 мин	26.06.03 — 1.04.04
ЮЗ-5 70 м	53.17	158.41	<u>1001</u> 310-1001	1,5	песча- ники, сланцы K ₂	холодный пресный	Кедр А2 10 мин	26.05.03 — 5.11.03

скважины в области фильтра - 168 мм. Скважиной вскрыты холодные пресные подземные воды. Уровень воды в скважине находится в 1.5 – 2 м ниже поверхности земли.

Наблюдения на обеих скважинах проводятся КОМСП ГС РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня и атмосферного давления Кедр А2 (ООО «Полином», г. Хабаровск). Частота регистрации - 10 минут. Точность регистрации уровня составляла 0.02 см, атмосферного давления – 0.2 мбар. Периоды наблюдений на скважине Е1 - с 26.06.2003 г. по 1.04.2004 г.; на скважине ЮЗ-5 - с 26.05.2003 г. по 5.11.2003 г.

Данные среднечасовых наблюдений на скважине ЮЗ-5 представлены на рис. 1. В изменениях уровня воды присутствуют барометрические вариации, приливные вариации и тренд. В изменениях тренда уровня воды присутствуют внутригодовые вариации с амплитудой 34 см, связанные с сезонным характером питания и расходования подземных вод верхнемеловых отложений, а также повышения уровня с амплитудами 1-2 см после выпадения осадков не менее 20 мм/сут, вызванные увеличением поверхностной нагрузки на кровлю резервуара. В высокочастотных изменениях уровня воды присутствуют приливные вариации с суточными амплитудами до 8 см и шумовые эффекты, связанные с режимом выпадения осадков и эффектами сейсмичности. Амплитуды косейсмических изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 при возникновении сильных землетрясений изменяются от 12 см [3] до менее 1 см.

В изменениях уровня скв. Е1 барометрические вариации проявляются в низкочастотной области для периодов не менее первых суток (рис. 2). Приливные вариации уровня не обнаружены. Изменение тренда уровня воды контролируется режимом изменения нагрузки на кровлю резервуара в результате выпадения осадков. По данным многолетних наблюдений в изменениях тренда уровня воды в скв. Е1 проявляются ко- и постсейсмические вариации в результате сильных землетрясений, а также предвестниковые изменения [4].

В районах обеих скважин амплитуды суточных изменений теоретической приливной объемной деформации составляют $3 - 5 \times 10^{-8}$ [1, 5]. В течение рассматриваемого периода наблюдений сильные землетрясения на Камчатке не происходили.

Барометрическая эффективность E_b для обеих скважин оценивалась путем построения амплитудных частотных передаточных функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (АЧПФ) [14]. При этом временной ряд атмосферного давления рассматривался в качестве входного сигнала $X(t)$, а временной ряд вариаций уровня – в качестве выходного сигнала $Y(t)$. Для оценки АЧПФ применялся кросс-спектральный анализ среднечасовых величин данных синхронной регистрации уровней воды и атмосферного давления.

Построение АЧПФ $A(f)$ включало последовательные процедуры: 1) построение усредненных кросс-периодограмм $S_{yx}(f)$ рядов $X(t)$ и $Y(t)$ 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

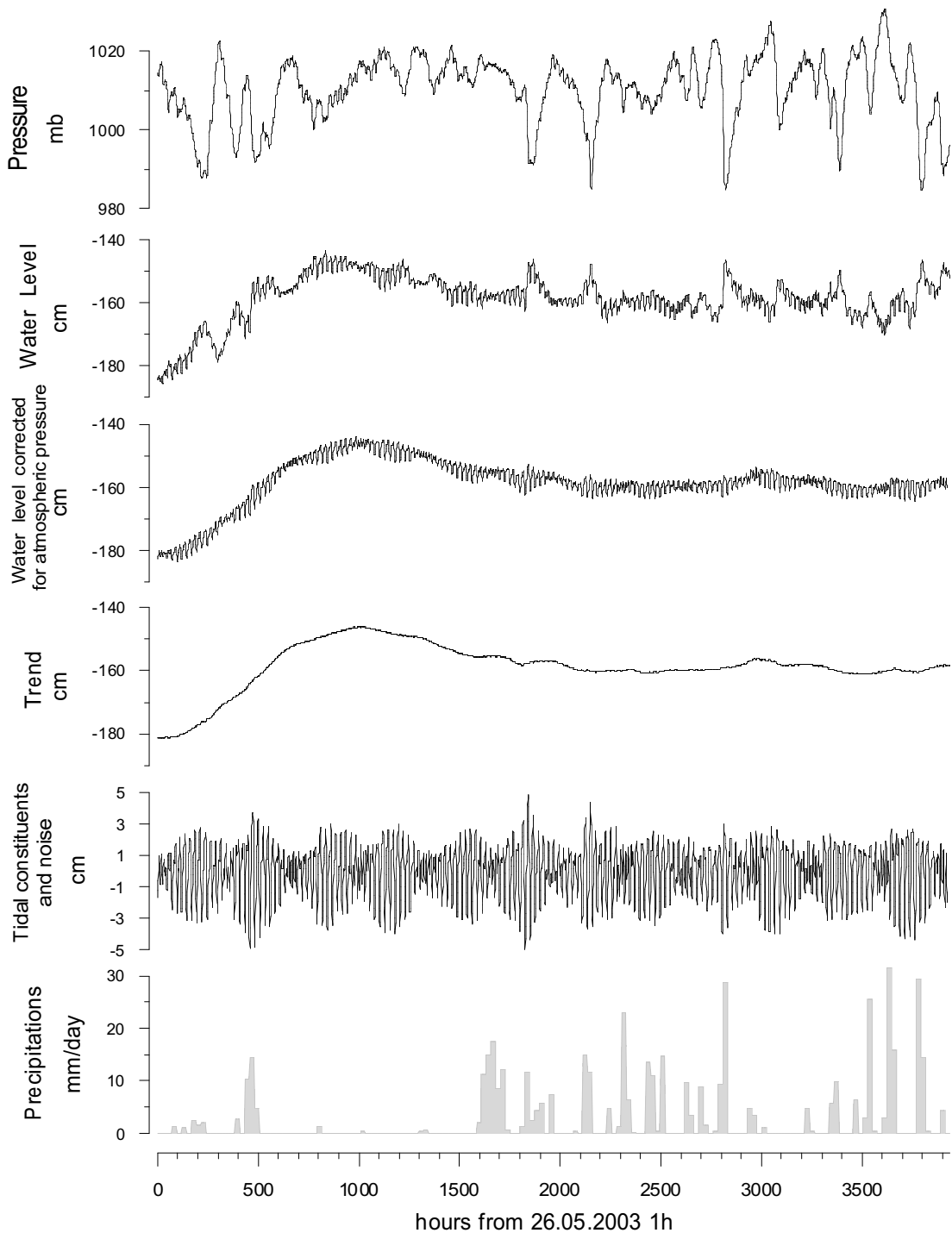


Рис. 1. Среднечасовые данные регистрации уровня воды и атмосферного давления в скв. ЮЗ-5 с 26 мая по 6 ноября 2003 г. в сопоставлении с суммарными за сутки осадками.

Fig. 1. Hourly records of the water level and barometric pressure in the well UZ-5 from May 26 to November 6, 2003. Daily precipitations are also shown.

к рядам $Y(t)$ и $X(t)$ в приращениях для подавления в них интенсивных низкочастотных составляющих и фильтрация в них частотных полос в диапазонах периодов 9-11 и 23-27 часов для удаления узкополосных суточных и полусуточных сигналов, искажающий барометрический отклик.

Амплитудные частотные передаточные функции для скважин Е1 и ЮЗ-5 представлены на рис. За в диапазоне часовых вариаций и характеризуют изменение барометри-

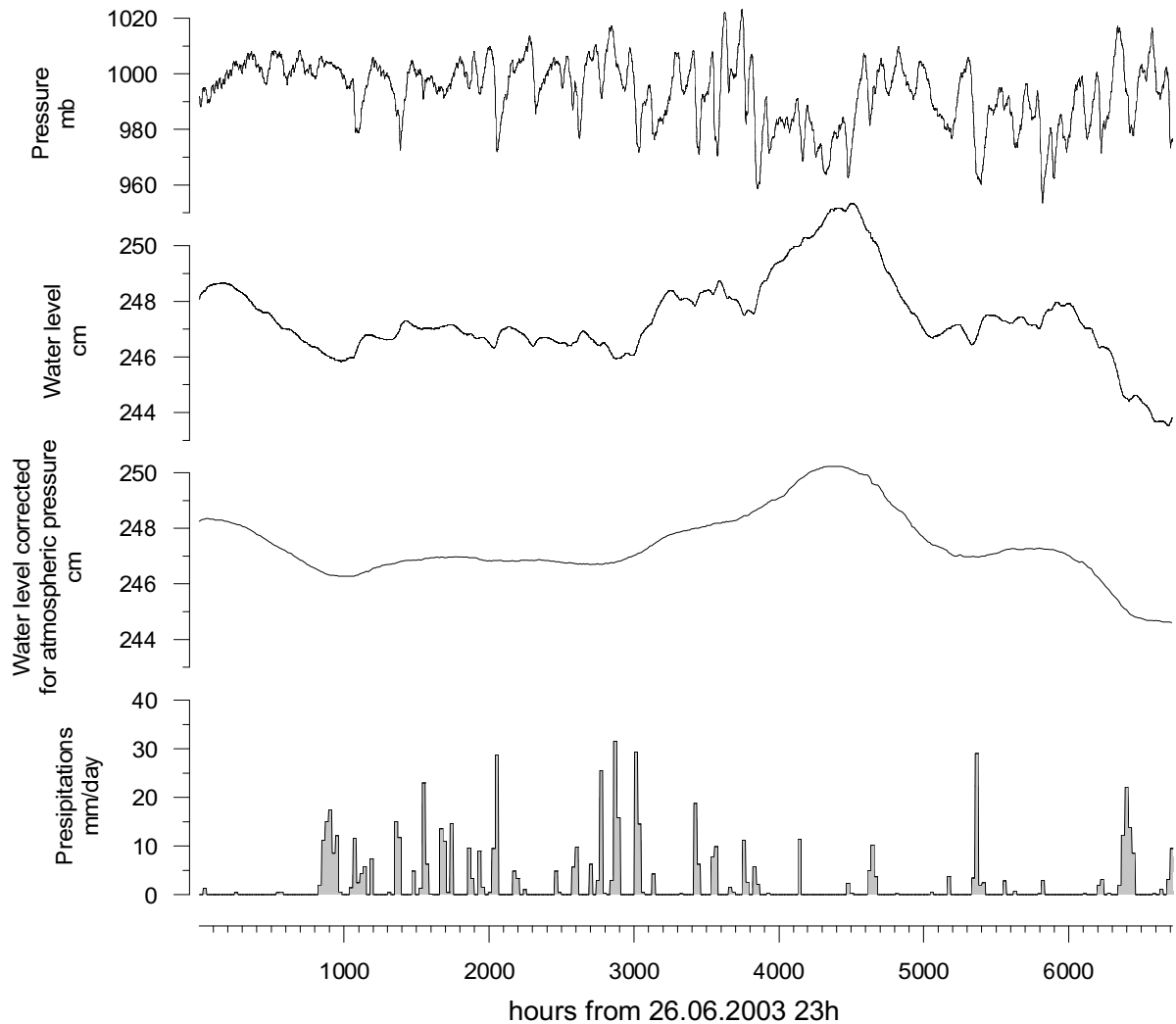


Рис. 2. Среднечасовые данные регистрации уровня воды и атмосферного давления в скв. E1 с 26 июня 2003 г. по 1 апреля 2004 г. в сопоставлении с суммарными за сутки осадками.

Fig. 2. Hourly records of the water level and barometric pressure in the well E1 from June 26, 2003 to April 1, 2004. Daily precipitations are also shown.

ческой эффективности E_b в зависимости от периода. Для скважины ЮЗ-5 наблюдается увеличение E_b в диапазоне периодов от 2 до примерно 6 часов от 0.2 до 0.37 см/мбар. На периоде 6 часов достигается максимальная величина $E_b = 0.37$ см/мбар, которая остается постоянной на периодах от 6 часов до суток и первых десятков суток. 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 контролируемого резервуара перекрывающими породами и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод [14, 16, 17-22]. Частотная зависимость барометрического отклика на периодах 2-6 часов обусловлена инерционными эффектами течения воды в скважину и из скважины [16, 21].

Меньшие величины барометрической эффективности E_b и ее более медленный рост с увеличением периодов отмечается для скважины E1 (рис 3а). В часовом диапазоне максимальная величина E_b , равная 0.011 см/мбар, достигается на периодах 45-50 часов, при этом разность фаз между изменениями уровня воды и атмосферного давления составляет $106 - 109^\circ$. Это указывает на относительно слабую связь резервуара и скважины и на ее значительную инерционность в диапазоне периодов от часов до первых суток [4]. Рост величины E_b продолжается и в диапазоне суточных вариаций при максималь-

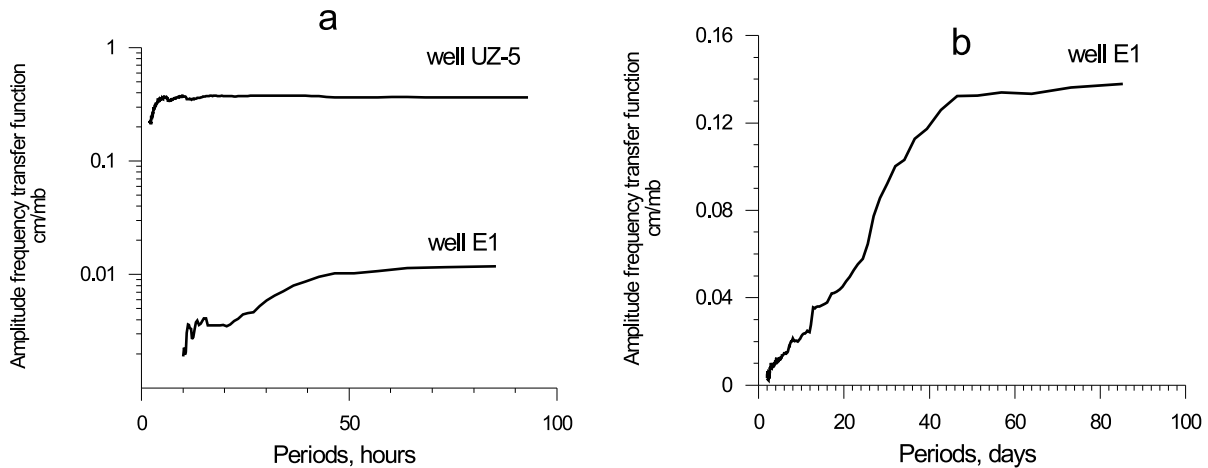


Рис. 3. Амплитудные частотные передаточные функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1:

а – в часовом диапазоне; б – в суточном диапазоне.

ном значении 0.135 см/мбар на периодах 45 - 100 суток (рис. 3б). При этом разность фаз в суточном диапазоне возрастает до 130-166°. Это показывает, что влияние инерционных эффектов в скважине прослеживается и в суточном диапазоне вариаций уровня воды. В этом заключается существенное отличие формирования барометрического отклика скв. Е1, по сравнению со скважиной ЮЗ-5, для которой E_b остается постоянной как в часовом, так и в суточном диапазоне вариаций.

Отличие в формировании барометрического отклика скважин объясняется индивидуальными особенностями наблюдательных систем «скважина – резервуар». Причинами увеличения барометрической эффективности с ростом периода вариаций и отсутствия приливного отклика в изменениях уровня воды в скв. Е1 могут быть: 1) слабая связь резервуара и скважины и высокая инерционность наблюдательной системы; 2) присутствии газовой фазы в составе флюида, заполняющего внутриводяное пространство резервуара [4]. Присутствие газа повышает сжимаемость внутриводяного флюида и понижает способность уровня воды откликаться на слабые высокочастотные возмущения напряженно-деформированного состояния резервуара.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5. На рис. 4а приводится периодограмма вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне приливных периодов 11 – 27 часов. В изменениях уровня воды выделяются приливные волны S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 [5, 24] с амплитудами от 1.4 см до десятых долей см.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды - амплитуд, амплитудного фактора (эквивалентного величине 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 [24]. Результаты анализа представлены в таблице 2. Жирным шрифтом обозначены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум не менее 10 (13.2 – 98.8). 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 об. деформации.

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 волн океанического прилива, имеющих такие же периоды, но отличающихся по фазе. Степень воздействия океанического прилива на изменение уровня воды можно качественно оценить по амплитудам остатков в изменениях уровня воды после компенсации баро-

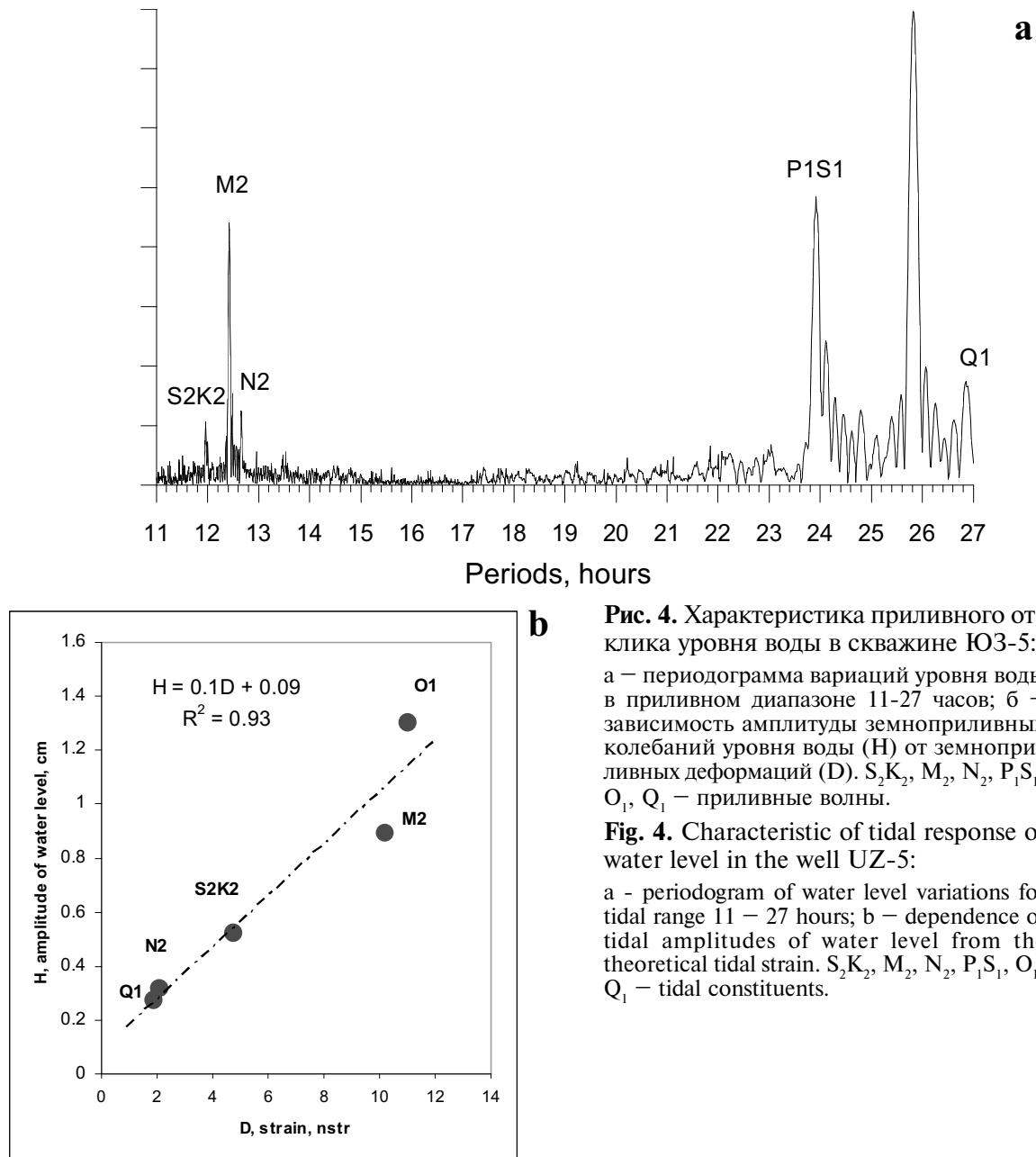


Рис. 4. Характеристика приливного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5:

а – периодограмма вариаций уровня воды в приливном диапазоне 11-27 часов; б – зависимость амплитуды земноприливных колебаний уровня воды (H) от земноприливных деформаций (D). S₂K₂, M₂, N₂, P₁S₁, O₁, Q₁ – приливные волны.

Fig. 4. Characteristic of tidal response of water level in the well UZ-5:

a - periodogram of water level variations for tidal range 11 – 27 hours; b – dependence of tidal amplitudes of water level from the theoretical tidal strain. S₂K₂, M₂, N₂, P₁S₁, O₁, Q₁ – tidal constituents.

метрического и приливного откликов. Процедура получения остатков в изменениях уровня воды после компенсации в них приливных и барометрических вариаций предусматривается в Eterna 3.0. Амплитуды вычисленных остатков в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 не превышают 0.1 – 0.2 см/сутки.

На рис. 4б приводится соотношение между амплитудами приливных волн в изменениях уровня воды и теоретическими амплитудами объемной деформации по модели приливного потенциала CTED [24]. Наблюдается линейная связь между этими величинами при значении коэффициента детерминации 0.93. Наличие сдвига линейной зависимости относительно нуля показывает, что оцененные амплитуды приливных волн в изменениях уровня могли быть завышены на 0.09 см, что, вероятно, определяется средней амплитудой случайных шумовых вариаций уровня воды. Угол наклона линейной зависимости, связывающей выделенные амплитуды приливных изменений уровня и соответствующих величин объемной деформации, составляет 0.097 см/10⁻⁹ и характеризует сжимаемость резервуара. Эта величина 0.097 см/10⁻⁹ ≈ 0.1 см/10⁻⁹ представляется наиболее приемлемой в качестве характеристики деформометрической чувствительности для скважины ЮЗ-5 во всем диапазоне приливных периодов.

Таблица 2. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 [24].

Волна	Амплитуда, ед. $\times 10^{-9}$ 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\pm0.003	167.62\pm0.18
O1	10.97	1.30	54.5	0.118\pm0.0005	173.61\pm0.03
M1	0.86	0.16	6.5	0.179 \pm 0.006	179.28 \pm 0.37
P1S1	15.43	1.09	45.7	0.070 \pm 0.0004	176.77 \pm 0.025
J1	0.86	0.081	3.4	0.094 \pm 0.008	169.92 \pm 0.45
OO1	0.47	0.069	2.9	0.146 \pm 0.010	-176.98 \pm 0.55
2N2	0.31	0.039	4.3	0.125 \pm 0.021	135.77 \pm 1.23
N2	1.95	0.27	29.9	0.139\pm0.004	-163.83\pm0.22
M2	10.18	0.89	98.8	0.088\pm0.0007	-159.53\pm0.04
L2	0.29	0.031	3.5	0.109 \pm 0.020	-51.88 \pm 1.14
S2K2	4.74	0.52	57.3	0.109\pm0.001	-140.48\pm0.081
M3	0.04	0.011	4.9	0.245 \pm 0.147	-115.34 \pm 8.42

Выявленные особенности проявления барометрического и приливного откликов уровней воды в скважинах Е1 и ЮЗ-5 позволяют сопоставлять их с другими скважинами с известными характеристиками соответствующих откликов. В качестве наблюдательных систем - аналогов скважины ЮЗ-5, могут рассматриваться скважина Бычиха, Хабаровский край: $E_b=0.57$, $A_s=0.147 - 0.159$ см/ 10^{-9} [6]; 500-метровая скважина в районе наблюдательной станции Какамура (КМК), Япония, $E_b=0.57$, $A_s=0.27$ см/ 10^{-9} [12]; скважина «Обнинск», Калужская область, $E_b=0.46$ [1, 2].

В случае скважины Е1 полных аналогов по литературным данным не обнаружено. Имеется только одна скважина, которая по особенностям ее режима может рассматриваться в качестве примерного аналога скважины Е1. Это скважина БВ, Калифорния, Паркфилдский полигон, глубиной 30 м [19]. Но для этой скважины, при отсутствии приливных вариаций уровня, фиксируется барометрический отклик с высокой величиной барометрической эффективности $E_b=0.86 - 0.91$ на периодах от 1 до 8 суток. Также, как и для скважины Е1, в резервуаре, вскрытом скважиной БВ, предполагается присутствие газа. Кроме этого, в изменениях уровня скважины БВ, также, как и для скважины Е1, отмечается одинаковый тип ко- и постсейсмического отклика, проявляющийся в длительных повышении уровня воды после землетрясений [4, 19]. Отличие скважины БВ от скв. Е1 заключается в отсутствии частотной зависимости ее барометрического отклика на периодах порядка суток, т. е. в случае скважины БВ для данного диапазона периодов может приниматься гипотеза о статически изолированных условиях в резервуаре и о постоянстве его упругих свойств. Кроме этого, в скв. БВ инерционные эффекты течения жидкости в высокочастотной области проявлены значительно слабее. Поэтому отсутствие приливного отклика в изменениях ее уровня связано, в основном, не с процессами водообмена между скважиной и резервуаром, а исключительно с повышенной сжимаемостью внутрипорового флюида из-за присутствия газа.

В случае скважины Е1 наблюдается зависимость отклика уровня воды на внешнее воздействие от его периода и интенсивности. Такую особенность наблюдательной системы «скважина – резервуар» можно объяснить частотно-зависимой изменчивостью упругих свойств резервуара. При увеличении периода и амплитуды возмущения способность уровня воды в скв. Е1 откликаться на изменения напряженного состояния резервуара, по-видимому, повышается. Возможно, это связано с особенностями фазового состояния внутрипорового флюида в зависимости от периода и интенсивности внешних воздействий.

Определение упругих свойств и пористости резервуаров подземных вод

Оценка пористости и сжимаемости резервуаров подземных вод для квазистатических изолированных условий может производиться на основе изучения характера откликов уровней воды в скважине на земные приливы и на атмосферное давление. При этом полагается, что вскрытый скважиной водоносный пласт имеет бесконечную протяженность в пространстве и состоит из пористых проницаемых материалов, ограниченных выше и ниже непроницаемыми материалами [6, 10, 12, 17-19, 22].

Изменения атмосферного давления приводят к вариациям давления в резервуаре. При этом изменение атмосферного давления происходит одновременно и равномерно по всему водоносному пласту, поэтому горизонтальным перемещением скелета и жидкости из-за атмосферной нагрузки в (1) – (2), обычно, пренебрегается [6, 14, 22]. В этом случае изменение вертикальной компоненты напряжения принимается равным изменению атмосферного давления на поверхности, и величина E_b связывает изменение порового давления и вертикальную компоненту напряжения.

Эффект воздействия земных приливов в приповерхностных условиях заключается в появлении малых горизонтальных деформаций, которые вычисляются из упругих свойств Земли и ее гравитационного взаимодействия с Луной и Солнцем [5, 24]. При этом вертикальное напряжение принимается постоянным. В этом случае, при отсутствии потоков подземных вод, т.е. для квазистатических условий в резервуаре, можно оценить изменение порового давления при изменении приливной деформации.

Известно, что наблюдательная система «скважина – резервуар» на достаточно больших периодах колебаний уровня, соответствующих приливным и барометрическим, представляет механический фильтр низких частот по отношению к изменениям напряженно-деформированного состояния резервуара [2]. Полоса пропускания и крутизна амплитудной характеристики определяются геометрическими параметрами скважины и фильтрационными параметрами вскрытого скважиной резервуара. Для относительно высокочастотных возмущений нагрузки и при хороших фильтрационных свойствах резервуара, система «скважина – резервуар» может иметь амплитудную характеристику резонансного типа. Периоды колебаний, где ожидаются резонансные пики, имеют порядок нескольких секунд – десятков секунд [9].

В области высокочастотных изменений порового давления ослабление отклика уровня воды в скважине на вариации порового давления происходит, в основном, из-за течения жидкости в ствол скважины и из него. Пропускная способность механического фильтра в диапазоне периодов от менее секунды и до свыше десятков секунд зависит от фильтрационных и упругих свойств водонасыщенных пород, слагающих резервуар; геометрических особенностей скважины, а также от степени совершенства связи скважины и резервуара. Частотная зависимость барометрического отклика в области малых периодов объясняется, как правило, именно инерционными эффектами течения жидкости.

С другой стороны, природные резервуары подземных вод более или менее несовершенны изолированы. В [21] показано, что степень изолированности резервуаров можно оценить по изменениям барометрической эффективности в зависимости от частоты. При ослаблении барометрического отклика в области суточных периодов предполагается наличие вертикального потока через перекрывающую толщу и влияние изменений уровня грунтовых вод на вариации порового давления в резервуаре.

Скважина ЮЗ-5 имеет постоянный барометрический отклик и фазу 180° для периодов более 6 часов. В суточном диапазоне вариаций ослабление барометрического отклика не наблюдается, что указывает на хорошую изоляцию резервуара и на отсутствие в нем значимого вертикального течения подземных вод. Поэтому величина $E_b=0.37$ является представительной статически изолированной барометрической эффективностью для этой скважины [20]. В диапазоне приливных периодов ослабление барометрической эффективности не обнаружено. Это указывает на регистрацию полного

приливного отклика порового давления на приливные деформации резервуара. Величина приливной деформометрической чувствительности A_s для статически изолированных условий принимается равной $0.1 \text{ см}/10^{-9}$.

Согласно [22], сжимаемость скелета резервуара β , коэффициент Скемптона B , и пористость ϕ при статически-изолированных условиях дается как (9)-(13). По [6] величина модуля сдвига определяется как (8).

По формулам (8)-(13) проведен расчет модуля сдвига G , величин сжимаемостей скелета резервуара β и β_u для дренированных и недренированных условий, пористости ϕ , коэффициента Скемптона B , и удельной упругой емкости резервуара S_s для резервуара, вскрытого скважиной ЮЗ-5. В расчетах принимались следующие величины сжимаемости твердой фазы скелета $\beta_s = 0.3 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц), сжимаемости жидкости $\beta_f = 4.4 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, плотность воды $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$, ускорение силы тяжести $g = 9.8 \text{ м}/\text{с}^2$, дренированный коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$ и недренированный коэффициент Пуассона $\nu_u = 0.3$. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Полученные величины пороупругих параметров резервуара скважины ЮЗ-5 (табл. 3) оценены приблизительно. Это следует, например, из некоторого различия величин параметров, определяемых для различных приливных волн. Однако, сравнение величин β , β_u , 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 пороупругих параметров и пористости с данными петрофизических исследований пород и расчетов, выполненных авторами работы [23] для резервуаров, сложенных песчаниками, показывает, что величины упругих параметров и пористости из табл. 3 согласуются с данным из [23].

Частотная зависимость барометрического отклика уровня воды в скв. Е1 в диапазоне часовых и суточных периодов указывает на нестационарность условий формирования отклика уровня воды на изменения порового давления. Скважина Е1 не реагирует на приливы, поэтому величина A_s для нее не установлена. Существенное ограничение возможности оценки параметров резервуара скважины Е1 обусловлены присутствием газовой фазы во внутривпоровом флюиде и зависимостью степени его сжимаемости от порового давления.

Реакция уровня воды в скважине ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления в резервуаре

Приливные деформации не вызывают течение воды в совершенно изолированных резервуарах подземных вод, т.к. 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 и т.д.) 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

$$x_0 = p_0 / \rho g = h_0, \quad (14)$$

где ρ - плотность жидкости, и g - гравитационное ускорение.

Таблица 3. Результаты оценки барометрической эффективности, приливной деформометрической чувствительности и параметров резервуара подземных вод, скважина ЮЗ-5, Камчатка.

Волны	Барометрическая эффективность E_b	Деформометрическая чувствительность A_s м/10 ⁻⁷ деформации	Дренированная сжимаемость β 10 ⁻¹¹ Па ⁻¹	Недренированная сжимаемость β_u 10 ⁻¹¹ Па ⁻¹	Модуль сдвига G 10 ¹⁰ Па	Коэффициент Скемптона B	Удельная упругая емкость S_s 10 ⁻⁷ м ⁻¹	Пористость ϕ
N ₂	0.37	0.13	11.5	2.7	1.7	0.69	15.4	0.10
M ₂	0.37	0.088	16.9	4.0	1.2	0.69	22.8	0.14
O ₁	0.37	0.118	12.6	3.0	1.6	0.69	17.0	0.11
Q ₁	0.37	0.150	9.9	2.3	2.0	0.69	13.4	0.08
	0.37	0.1*	14.9*	3.5*	1.3*	0.69*	20.0*	0.12*

Примечание: * - характерное значение для всего диапазона приливных периодов (рис. 4 б).

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 (14), и будет запаздывать по отношению к пику напора в резервуаре h_0 . Для этой ситуации выражения для зависимости x_0/h_0 приведены в [10]. Если силами инерции в столбе воды в скважине пренебрегается, то амплитудное соотношение (соотношение между амплитудой изменений уровня воды в скважине и амплитудой изменения гидростатического напора в резервуаре) определяется как

$$A = x_0 / h_0 = (E^2 + F^2)^{1/2} \quad (15),$$

а фазовый сдвиг определяется как

$$\eta = \arg(x_0 / h_0) = \arctan(F / E). \quad (16)$$

При этом

$$E = 1 - \beta_w (\psi \text{Ker} \alpha_w + \phi_w \text{Kei} \alpha_w) \quad (17)$$

$$F = \beta_w (\phi_w \text{Ker} \alpha_w - \psi \text{Kei} \alpha_w) \quad (18)$$

$$\phi_w = \frac{-(\text{Ker}_1 \alpha_w + \text{Kei}_1 \alpha_w)}{2^{1/2} \alpha_w (\text{Ker}_1^2 \alpha_w + \text{Kei}_1^2 \alpha_w)} \quad (19)$$

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

$$\alpha_w = r_w (\omega S_s / T)^{1/2} \quad (21)$$

$$\beta_w = \pi \omega r_c^2 r_w / (A_w T), \quad (22)$$

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

В (15) – (20) $\text{Ker} \alpha_w$, $\text{Kei} \alpha_w$ 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), а α_w и β_w - безразмерные функции частоты, выраженные через параметры резервуара и геометрические параметры скважины r_w - радиуса скважины в районе фильтра, r_c - радиуса скважины в верхней

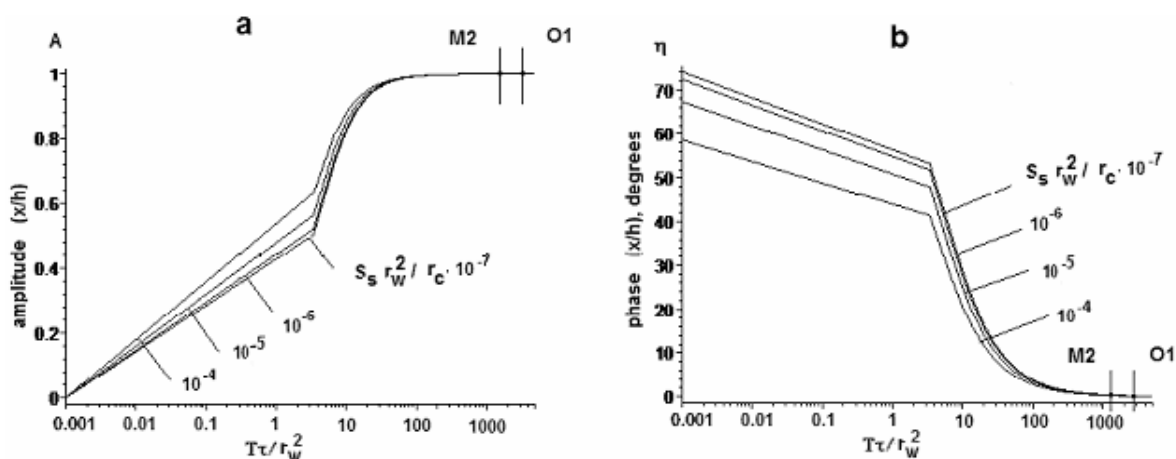


Рис. 5. Графики изменений сдвига при различных значениях $T\tau/r_w^2$ и $S_s r_w^2/r_c$ для: а - амплитудного соотношения между изменениями уровня воды и напором в резервуаре; б - фазового запаздывания.

Fig. 5. Diagrams of shift by different valuations of $T\tau/r_w^2$ and $S_s r_w^2/r_c$ for: а - amplitude ratio of water level with respect to reservoir head; б - phase lag of water level behind reservoir head.

части скважины, где происходят колебания уровня воды, A_w - площадь фильтра, S_s - удельная упругая емкость резервуара и T - коэффициент водопроницаемости резервуара ($T = kd$, где k - коэффициент гидравлической проницаемости в законе Дарси (5) и d - мощность резервуара).

Таким образом, искажение амплитуды изменения уровня по отношению к периодическим изменениям порового давления зависит от коэффициента водопроницаемости резервуара T , удельной упругой емкости резервуара 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 в резервуаре, используя данные из таблицы 3. По (12) величина удельной упругой ёмкости резервуара составляет порядка $S_s = 20 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ ($13.4 - 23.8 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ (табл. 3)). 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 фильтра $A_w = 3 \text{ м}^2$ и заданных величинах коэффициента гидравлической проницаемости k от $2 \times 10^{-9} \text{ м/с}$ до $2 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ [23] получаем оценку для параметра T/r_w^2 в интервале от $2.8 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до $2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. 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. 5.

При $k = 2 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ или $T/r_w^2 = 2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ на периодах меньше 1 с скважина работает как низкочастотный фильтр (амплитудное соотношение A менее 0.2). На периодах от 1 с до примерно 1 часа величина A возрастает, но не превышает единицы. На периодах более 1 часа амплитудное соотношение практически достигает единицы. При определенных соотношениях параметров резервуара и скважины на периодах 1-30 с (поверхностные сейсмические волны Рэлея) амплитудное соотношение из-за резонанса может возрасти до нескольких сотен [9]. В нашем случае резонансное увеличение амплитудного соотношения не наблюдается. И это указывает на то, что в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 сигналы от поверхностных сейсмических волн в случае возникновения сильных землетрясений, по-видимому, регистрироваться не будут, как это наблюдалось, например, в результате Аляскинского землетрясения 1964 г. в некоторых скважинах США [9].

На длинных периодах, соответствующих приливным и барометрическим воздействиям, искажение отклика уровня воды на изменение порового давления не возникает, и A приблизительно равно 1. Фазовое искажение на малых периодах ($\tau \leq 1 \text{ с}$) достигает 74° , а на длинных периодах сдвига фаз между вариациями гидростатического напора в резервуаре и вариациями уровня практически нет ($\eta \approx 0^\circ$) (рис. 5б).

На приливных периодах $\tau \approx 12-26$ часов величина амплитудного соотношения x_0/h_0 равна 1 при величинах параметра $T \tau/r_w^2$ более 10^3 (рис. 5а), а теоретическое фазовое запаздывание x_0 по отношению к h_0 не превышает одного градуса (рис. 5б). Для периодов приливных волн M_2 ($\tau \approx 12.42$ ч) и O_1 ($\tau \approx 25.82$ 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. 5)). Следует отметить, что использование величины коэффициента гидравлической проводимости k в диапазоне $2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-9}$ 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 в резервуаре служит косвенным подтверждением правильности приведенных оценок пороупругих параметров резервуара на относительно длинных периодах (таблица 3).

Если подставить в (7) величины теоретической приливной деформации для отдельных волн (табл. 2) и использовать вычисленные величины коэффициента Скемптона B , модуля сдвига G (табл. 3) и принятую величину недренированного коэффициента Пуассона $\nu_u = 0.3$, то получаем ожидаемые теоретические амплитуды приливных вариаций порового давления Δp . Перевод величин в эквивалентные амплитуды изменения уровня воды Δh показывает, что для волны M_2 ожидается теоретическая амплитуда повышения уровня 1.81 см, O_1 - 2.62 см, Q_1 - 0.64 см и N_2 - 0.51 см. Расчетные величины в два раза превышают соответствующие величины амплитуд, получаемые из приливного анализа (табл. 2). Такое несоответствие можно объяснить тем, что, во-первых, фактические величины приливных деформаций в области резервуара скважины ЮЗ-5 не известны. Для этого необходимы деформометрические измерения непосредственно в районе скважины ЮЗ-5. Во-вторых, в результатах приливного анализа уронемерных данных не учитывается океаническая нагрузка.

Не более определенной является и правильность соответствия между теоретическим фазовым сдвигом η (менее 1°) и расчетной величиной разности фаз между земным приливом и изменениями уровня воды (табл. 2). Учитывая, что разность фаз между приливной волной и изменением уровня воды должна соответствовать 180° , в случае вскрытия скважиной изолированного резервуара при отсутствии инерционных эффектов водообмена и без учета океанической нагрузки, то можно оценить запаздывание для хорошо выделяемых волн Q_1 (12°), O_1 (6°), N_2 (16°), M_2 (20°) (табл. 2). Полученное несоответствие в $6 - 20^\circ$, скорее всего, связано с несовершенством использованной теоретической модели земного прилива и недоучетом влияния океанического прилива на изменение уровня воды в скважине ЮЗ-5. Возможно, что более точные оценки параметров резервуара скв. ЮЗ-5 и построение адекватной модели отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара могут быть получены при комплексировании уронемерных и деформометрических наблюдений.

Выводы

1. По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважинах Е1 и ЮЗ-5 выполнена оценка величины барометрической эффективности в диапазоне часовых-суточных периодов.

Для скважины ЮЗ-5 в диапазоне вариаций уровня воды и атмосферного давления от 6 часов и более величина E_b постоянна и равна 0.37 см/мбар при разности фаз между вариациями уровня и атмосферного давления 180° . Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в резервуаре, вскрытом скважиной ЮЗ-5.

Для скважины Е1 обнаружена частотная зависимость изменения барометрической эффективности в диапазоне периодов часы - сутки - десятки суток. При увеличении периода вариаций происходит увеличение E_b от менее 0.01 до 0.135 см/мбар при увеличении разности фаз от 106° до 166° . Особенности барометрического отклика уровня

в скв. Е1 обусловлены присутствием газовой фазы во флюиде и зависимостью сжимаемости внутрипорового флюида и упругих параметров резервуара от давления.

2. На основании приливного анализа данных уровнемерных наблюдений на скв. ЮЗ-5 и величины барометрической эффективности рассчитаны параметры резервуара - дренированная и недренированная сжимаемости, модуль сдвига, коэффициент Скемптона, удельная упругая емкость и пористость.

3. Построена модель изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 при периодическом изменении порового давления в резервуаре 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-первых сотен часов, соответствующих диапазону действия барометрических, приливных и медленных сейсмотектонических 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.

Список литературы

1. Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др. Исследование земноприливных 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. Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А., Смирнов А.А., Таранова Л.Н. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4, с. 69-79.
4. 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.
5. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968, 482 с.
6. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Корчагин Ф.Г., Запреева Е.А. Мониторинг упругих параметров водонасыщенного пласта по наблюдениям уровня воды в скважинах // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 8, с. 840-850.
7. Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. 1941. V. 12, p. 155-164.
8. 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.
9. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, p. 3915-3926.
10. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res.. 1987. V. 23, p. 1824-1832.
11. Kumpel H.-J. Poroelasticity: parameters reviewed // Geophys. J. Int. 1991. V. 105, p. 783 – 799.
12. Igarashi G., Wakita H. Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. B3, p. 4269-4278.
13. 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.
14. Quilty E.G., Roeloffs E.A. Removal of barometric pressure response from water level data // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. No. B6, p. 10209 – 10218.

15. 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.
16. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // *Pure Appl. Geophys.* 1988. V. 126, p. 177-209.
17. Roeloffs E. A., S.S. Burford, F.S. Riley, A.W. Records. Hydrologic effects on water level changes associated with episodic fault creep near Parkfield, California. // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, p. 12387-12402.
18. Roeloffs E. A. Poroelastic methods in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, in *Advances in Geophysics*, edited by R. Dmowska, Academic, San Diego, Calif, 1996.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. Rojstaczer, S., and D.S. Agnew, 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.
23. 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.
24. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // *BIM.* 1994. № 118, h. 8719-8721.