

Работы молодых ученых

УДК 550.832.9:556.34.042

ОЦЕНКА ПОРОУПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНЕ Ю35, КАМЧАТКА

© 2004 С. В. Болдина

*Камчатский государственный педагогический университет, аспирант. Петропавловск-Камчатский, 683006, Пограничная, 4
683038, Петропавловск-Камчатский, проспект Циолковского, д.17, кв.12, Болдина С.В.; тел. (41522)75987; e-mail: boldina@mail.iks.ru*

По данным синхронных наблюдений за уровнем воды и атмосферным давлением в скважине Ю35, Камчатка, оцениваются величины барометрической эффективности и приливной деформометрической чувствительности системы скважина-резервуар. Показано, что для скважины может приниматься гипотеза о статически изолированном упругом отклике резервуара на атмосферную и приливную нагрузку. На основе теории пороупругости рассчитываются пористость и параметры резервуара скважины: дренированная сжимаемость скелета водовмещающих пород, коэффициент порового давления (коэффициент Скемптона), модуль сдвига и упругая емкость резервуара. Рассматривается модель реакции уровня воды в скважине 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 (Roeloffs, 1988; и др.). Такие модели разрабатываются на основе теории пороупругости, изложение которой дано в работах (Biot, 1941; и др.). 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 (Мельхиор, 1968; и др.).

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 (Rice, Cleary, 1976; и др.).

Линейная теория пороупругости включает систему уравнений, связывающих изменения деформации и напряжения в скелете породы с поровым давлением с учетом сжимаемости скелета и упругого изменения объема жидкости. В качестве основных констант этих уравнений принимаются: модуль сдвига G , дренированный ν и недренированный ν_u коэффициенты Пуассона, коэффициент порового давления (коэффициент Скемптона) B и коэффициент диффузии порового давления c .

Уравнение связи деформаций и напряжений в твердой матрице с поровым давлением флюида для пороупругой среды дается как:

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

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:

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

Коэффициент Скемптона B выражается из уравнения

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

Коэффициент диффузии c равен

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

где k - коэффициент фильтрации.

Пределы изменения параметров ν, ν_u и B :

$$\nu \leq \nu_u \leq 0.5 ; 0 \leq B \leq 1.$$

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 и напряжением в твердом скелете

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

- закон Дарси, связывающий скорость фильтрации флюида 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 (Rice, Cleary, 1976; Roeloffs, 1988)

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

где $\Delta\varepsilon$ - 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 относительно медленных изменениях порового давления, 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. По реакции уровня воды в скважине на атмосферное давление оценивается величина барометрической эффективности E_b (Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1988; и др.)

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

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 (Rojstaczer, Agnew, 1989). Для условий квазистатического изолированного барометрического отклика резервуара величина E_b связана с коэффициентом порового давления B и коэффициентом Пуассона ν_u как (Rojstaczer, Agnew, 1989)

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

По реакции уровня воды в скважине на земные приливы оценивается величина приливной деформометрической чувствительности: A_s (Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1988):

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

где dh_t - амплитуда приливных изменений уровня воды, ε_t - приливная объемная деформация. Величина характеризует способность порового давления откликаться на изменение эффективного 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 (Roeloffs, 1988). Для описания индивидуальных свойств таких систем используются следующие параметры:

а) параметры, характеризующие упругие свойства резервуаров подземных вод: сжимаемость порового флюида β_f , недренированная (при условии постоянства массы флюида) сжимаемость твердой фазы скелета β_u , дренированная (при условии 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: ϕ пористость k и коэффициент фильтрации;

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 равномерных 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 недренированной сжимаемости

породообразующих минералов β_u могут оцениваться величины поровых параметров резервуара для квазистатических изолированных условий (Igarashi, Wakita, 1991):

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

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

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

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

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

Наличие потоков воды в резервуаре, эффекты течения воды в скважину и из скважины при изменениях порового давления и атмосферной нагрузки могут вносить искажения в оцениваемые величины параметров по (9) - (13). Возможность применения указанных формул требует предварительного обоснования статически изолированных условий в резервуаре и оценку роли инерционных эффектов течения воды в скважину и из скважины (Rojstaczer, Agnew, 1989).

В настоящей работе проводится оценка параметров барометрического и приливного откликов по данным равномерных наблюдений на скважине Ю35, определение упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, вскрытого скважиной; построение модельной зависимости реакции уровня воды в скважине на периодические изменения порового давления в резервуаре.

Характеристика данных наблюдений

Скважина Ю35 (координаты 53.17° с. ш., 158.41° в. д. глубина 1001 м.) расположена на Восточном побережье Камчатки на удалении 15-25 км от Авачинского залива (Копылова, 2000). Скважина обсажена металлической колонной до глубины 310 м. Интервал глубин 310-1001 м представляет дрину, через которую скважина связана с резервуаром подземных вод. Здесь вскрыты неравномерные по водообильности туфоалевролиты и филлитовидные сланцы верхнемелового возраста. Суммарная мощность зон

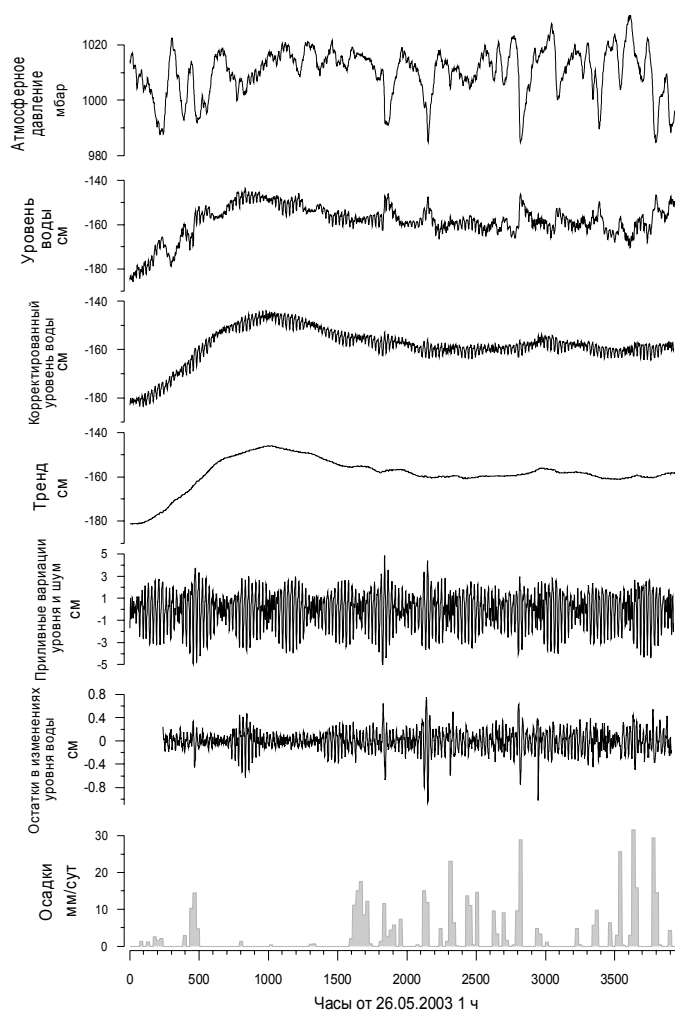


Рис. 1. Среднечасовые данные наблюдений за атмосферным давлением и уровнем воды, скважина Ю35, 26.05.2003 г.-5.11.2003 г., в сопоставлении с суточными осадками и изменениями теоретической приливной деформации. Представлены также изменения уровня воды с компенсированными баровариациями, выделенные тренд и высокочастотная составляющая в изменениях уровня воды, остаточные изменения уровня после компенсации барометрических и приливных вариаций по (Wenzel, 1994).

водопритока, приуроченных к прослоям трещиноватых алевролитов, составляет 100 м. Скважиной вскрыты холодные пресные подземные воды. Уровень воды в скважине находится в 0.5–1 м ниже поверхности земли. Наблюдения на скважине проводятся Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня и атмосферного давления «Кедр А2» (ООО «Полином», г. Хабаровск). Частота регистрации - 10 минут. Цель наблюдений – поиск гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Точность регистрации

уровня составляла 0.02 см, атмосферного давления – 0.2 мбар. Наблюдения на скважине проводились с 26.05.2003 г. по 5.11.2003 г.

На рис. 1 представлены данные среднечасовых наблюдений на скважине. В изменениях уровня воды присутствуют низкочастотный тренд, барометрические и приливные вариации. 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 составляют $(3-5) \times 10^{-8}$ (Мельхиор, 1968; и др.). В течение рассматриваемого периода наблюдений сильные землетрясения на Камчатке не происходили.

Оценка барометрического отклика уровня воды в скважине Ю35

Барометрическая эффективность оценивалась методом кросс-спектрального анализа по амплитудно-частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления $X(t)$ к изменениям уровня воды $Y(t)$. При этом временной ряд среднечасовых значений атмосферного давления рассматривался в качестве входного сигнала $X(t)$, а временной ряд среднечасовых вариаций уровня – в качестве выходного сигнала $Y(t)$. Амплитудно-частотная передаточная функция (рис. 2) характеризует изменение барометрической эффективности в зависимости от периода вариаций: наблюдается увеличение величины E_b в диапазоне периодов от 2 до 6 часов 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 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 резервуара перекрывающимися породами и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод, искажающих барометрический отклик. Частотная зависимость барометрического отклика на периодах 2-6 часов обусловлена инерционными эффектами течения воды

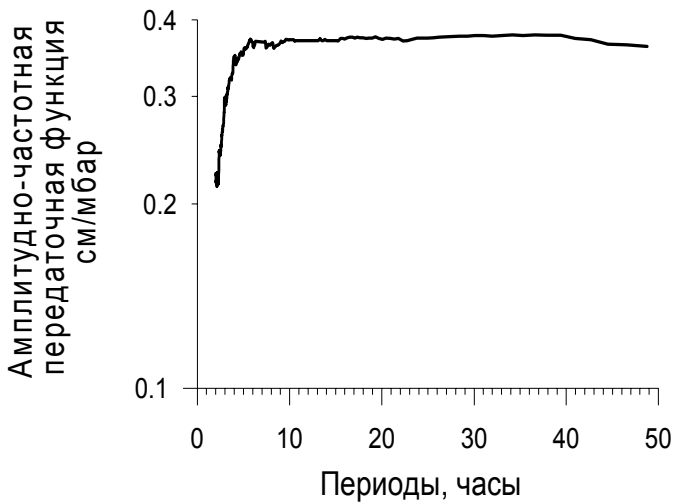


Рис. 2. Амплитудно-частотная передаточная функция от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважине Ю35 в диапазоне часовых вариаций.

в скважину и из скважины (Roeloffs, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989).

Оценка приливного отклика уровня воды в скважине Ю35

На рис. 3,а приводится периодограмма вариаций уровня воды в скважине в диапазоне приливных периодов 11 – 27 часов. В изменениях уровня воды выделяются волны S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 (Hsieh, 1987 и др.) с амплитудами 1.4-0.2 см.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды - амплитуд, амплитудного фактора (эквивалентного величине), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и соответствующей фазой приливного потенциала для отдельных волн, производилась с использованием программы Eterna 3.0 (Wenzel, 1994). Результаты анализа представлены в табл. 1. 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 $0.088 - 0.15 \text{ см}/10^{-9}$.

Различия в величинах 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

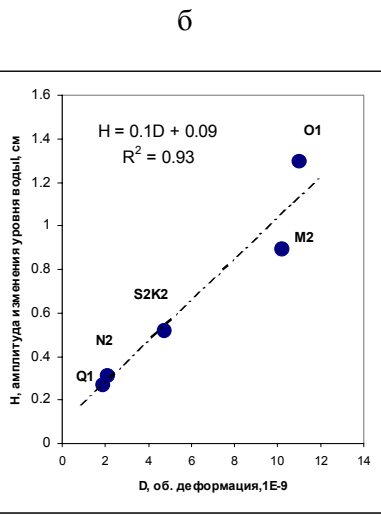
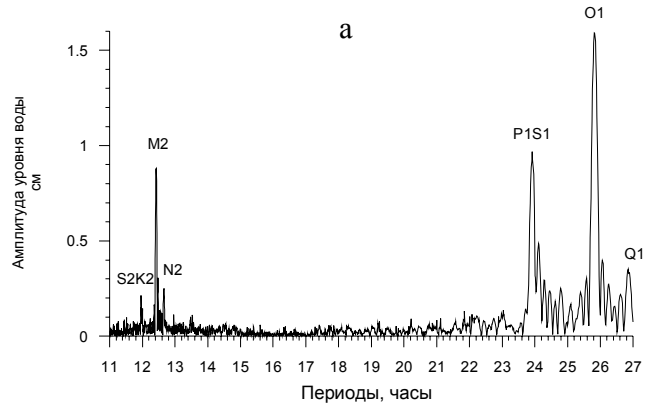


Рис. 3. Характеристика приливного отклика уровня воды в скважине Ю35: а – периодограмма вариаций уровня воды в приливном диапазоне 11–27 часов; б – зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин приливной деформации (табл. 1).

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 (Wenzel, 1994). 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 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,

Таблица 1. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине Ю35 по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994)

Волна	Амплитуда, ед. $\cdot 10^{-9}$ 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±0.0004	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
M₂	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. Выделены волны, для которых отношение сигнал/шум составило не менее 10.

составляет $\gg 0.1$ см/10⁻⁹. Эта величина представляется наиболее приемлемой в качестве характеристики деформометрической чувствительности для скважины во всем диапазоне приливных периодов.

Определение упругих свойств и пористости резервуара подземных вод, вскрытого скважиной Ю35

Оценка пористости и сжимаемости резервуаров подземных вод для квазистатических изолированных условий может производиться на основе изучения откликов уровней 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. 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 резервуара, система скважина–резервуар может иметь амплитудную характеристику резонансного типа. Периоды колебаний, где ожидаются резонансные пики, имеют порядок

нескольких секунд – десятков секунд (Соорег, 1965 и др.).

Ослабление отклика уровня воды в области высокочастотных изменений порового давления происходит, в основном, из-за течения жидкости в ствол скважины и из него. В области малых периодов, составляющих минуты-часы, частотная зависимость барометрического отклика объясняется инерционными эффектами течения жидкости в ствол и из ствола скважины.

Природные резервуары подземных вод обычно более или менее несовершенно изолированы. В (Rojstaczer, 1988) показано, что степень изоляции напорного резервуара перекрывающимися 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.

Скважина Ю35 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 от грунтовых вод и на отсутствие в нем значимых вертикальных течений. Поэтому величина $E_b=0.37$ является предельно статически изолированной барометрической эффективностью для этой скважины. В диапазоне приливных периодов ослабление барометрического отклика не

Таблица 2. Оценка упругих параметров и пористости резервуара подземных вод, скважина Ю35, при $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц)

Волны	Барометрическая эффективность E_b , см/мбар	Деформометрическая чувствительность A_s , м/10 ⁻⁷	Дренирующая 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.

наблюдается. 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 не известна, 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. Если принять величину сжимаемости твердой фазы скелета, равной величине недренированной сжимаемости кварца $\beta_u=0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, то можно получить приблизительные оценки пористости и упругих параметров резервуара (табл. 2). В расчетах принимались следующие величины: сжимаемость жидкости $\beta_f=4.4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, плотность воды $\rho=1.0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, ускорение силы тяжести $g=9.8 \text{ м/с}^2$, дренируемый коэффициент Пуассона $\nu=0.25$ и недренируемый коэффициент Пуассона $\nu_u=0.3$.

Оценочный характер полученных величин (табл. 2) следует, например, из некоторого различия величин параметров, определяемых для различных приливных волн. Однако, сравнение полученных величин β , G , B , S_s и ϕ с данными петрофизических исследований пород и расчетов для резервуаров, сложенных песчаниками, показывает, что величины упругих параметров и пористости из табл. 2 согласуются с данным из (Van der Kamp, Gale, 1983).

Реакция уровня воды в скважине Ю35 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 слабо-проницаемыми 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

$$x_0 = p_0 / \rho g = h_0, \tag{14}$$

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 (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 (Hsieh, 1987 и др.). 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

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

а фазовый сдвиг определяется как

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

При этом

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

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

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

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

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

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

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

В (17) – (22) $\text{Kei} \alpha_w$ 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 - радиус скважины в области ее связи с резервуаром, r_c - радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды, A_w - площадь, через которую скважина связана с резервуаром; S_s - удельная упругая емкость и T - коэффициент водопроводимости ($T = kd$, где k - коэффициент фильтрации в законе Дарси (7) и d - мощность резервуара).

Таким образом, искажение амплитуды изменения уровня по отношению к периодическим изменениям порового давления зависит от коэффициента водопроводимости 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 на изменения порового давления, используя данные из табл. 2. По (12) величина удельной упругой емкости составляет порядка $S_s = 18.7 \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ ($(11.3 - 25.8) \times 10^{-7} \text{ м}^{-1}$). 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 $2 \times 10^{-9} \text{ м/с}$ до $2 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ 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 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 меньше 1 с скважина работает как низкочастотный фильтр (амплитудное соотношение A менее 0.2). На периодах от 1 с до часа величина возрастает, но не достигает единицы. На периодах более часа амплитудное соотношение практически равно единице. 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 (Cooper et al., 1965). В нашем случае резонансное увеличение амплитудного соотношения не наблюдается. И это указывает на то, что в изменениях уровня воды в скважине сигналы от поверхностных сейсмических волн в случае возникновения сильного землетрясения регистрироваться не будут, как это наблюдалось, например, в результате Аляскинского землетрясения 1964 г. в некоторых скважинах США (Cooper et al., 1965).

На длинных периодах, соответствующих приливным и барометрическим воздействиям, величина A приближается к 1, т. е. в этом диапазоне искажение отклика уровня воды на изменение порового давления не ожидается. 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 воды практически нет ($\eta \approx 0^\circ$) (рис. 4, б).

На приливных периодах τ 12-26 часов 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 ($\tau \approx 12.42 \text{ ч}$) и O_1 ($\tau \approx 25.82 \text{ ч}$) 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). Следует отметить, что использование величины коэффициента фильтрации k в диапазоне $2 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-9} \text{ м/с}$ 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 и изменениями порового давления в резервуаре служит косвенным

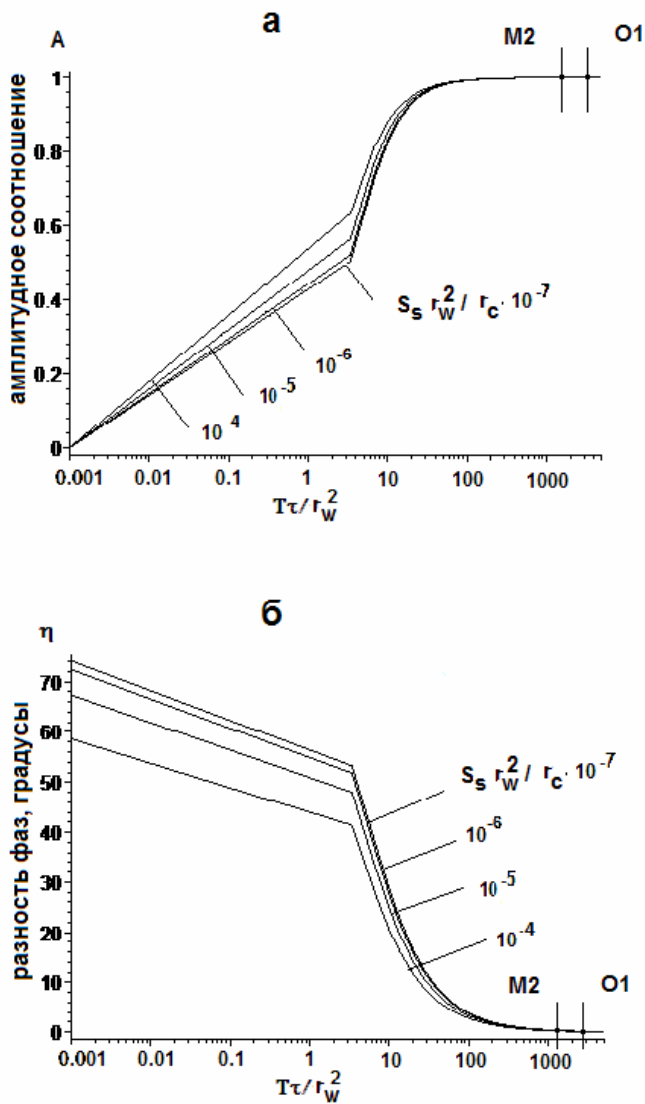


Рис. 4. Графики изменений сдвига при различных значениях $T\tau/r_w^2$ и $S_s r_w^2 / r_c$ для: а - амплитудного соотношения между изменениями уровня воды и напора в резервуаре; б - фазового запаздывания.

подтверждением правильности приведенных оценок пороупругих параметров резервуара на относительно длинных периодах (табл. 2).

Если подставить в (8) величины теоретической приливной деформации для отдельных волн (табл. 1), вычисленные величины коэффициента Скемптона B , модуля сдвига G (табл. 2) и принятую величину недренированного коэффициента Пуассона $\nu_u=0.3$, то можно получить ожидаемые амплитуды приливных вариаций порового давления Δp в резервуаре скважины. Перевод величин 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. 1). Такое несоответствие можно объяснить, во-первых, тем, что фактические величины приливных деформаций в области резервуара не известны. Для этого необходимо провести приливные деформометрические измерения непосредственно в районе скважины. Во-вторых, в результатах приливного анализа урвнмерных данных не учитывается нагрузка от океанического прилива, которая может искажать величины выделенных амплитуд приливных волн (Igarashi, Wakita, 1991).

На рис. 1 представлены изменения остатков в изменениях уровня воды в скважине после компенсации барометрического и теоретического приливного воздействий по алгоритму (Wenzel, 1994). 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 1-1.7 см при величине стандартного отклонения для всего ряда ± 0.18 см. Наличие остатков в изменениях уровня воды после компенсации основных факторов-помех - атмосферного давления и земноприливного воздействия, обусловлены шумовыми эффектами в регистрации уровня воды и атмосферного давления.

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. 1) Q_1 (12°), O_1 (6°), N_2 (16°), M_2 (20°). Полученное несоответствие в $6-20^\circ$, скорее всего, связано с недоучетом влияния океанического прилива на изменение уровня воды в скважине, т. е. с несовершенством использованной теоретической модели приливного воздействия. Более точные оценки параметров резервуара скважины и построение адекватной модели отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара могут быть получены при комплексировании урвнмерных и деформометрических наблюдений.

Выводы

1. По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважине Ю35 (май-сентябрь 2003 г) исследован барометрический отклик и выполнена оценка величины барометрической эффективности в диапазоне часовых-суточных периодов: величина E_b постоянна и равна 0.37 см/мбар при разности фаз 180° .

2. На основании приливного анализа данных уровнемерных наблюдений (с использованием программы ETERNA 3.0) и величины ее барометрической эффективности оценены параметры резервуара, вскрытого скважиной Ю35, - дренированная сжимаемость скелета водовмещающих пород, модуль сдвига, коэффициент Скемптона, удельная упругая емкость и пористость.

3. Построена модель изменений уровня воды в скважине Ю35, соответствующих действию барометрических и приливных вариаций напряженно-деформированного состояния среды.

Автор выражает благодарность научному руководителю к. г.-м. н. Копыловой Г.Н. за постановку настоящей работы.

Список литературы

Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканонология и сейсмологи. 2000. № 4. С. 69-79.

Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. С. 482

Biot M.A. General theory of three-dimensional consolidation // J. Appl. Phys. 1941. V. 12. P. 155-164.

Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915-3926.

Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.

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.

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.

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.

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.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // ВИМ. 1994. № 118. P. 8719-8721.

The Assessment of Poroelastic Properties of Underground Water Reservoir (on Data of Water Level Observations on Well UZ5, Kamchatka)

S. V. Boldina

Kamchatkan State Pedagogical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006

The values of barometric efficiency and tidal strain sensitivity of a system the well-reservoir are estimated on the data of synchronic water level and atmospheric pressure observations on the well UZ5, Kamchatka. It is show, that the hypothesis of the confined elastic response of the reservoir to the atmospheric and tidal loading can be accepted. Porosity and parameters of the reservoir (drained matrix compressibility, coefficient of pore pressure (Skempton's coefficient), shear modulus, and specific storage) are evaluated on the basis of the theory poroelasticity. The behavior pattern of water level in the well UZ5 is considered by periodical variations of pore pressure.