

УДК 550.832.9:556.34.042

## ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННОГО ЭФФЕКТА ВОДООБМЕНА МЕЖДУ СКВАЖИНОЙ И РЕЗЕРВУАРОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

© 2006 С. В. Болдина, Г. Н. Копылова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: holdina@mail.iks.ru; gala@emsd.iks.ru,*

На основе теоретической модели изменений уровня воды в скважине при периодических вариациях порового давления, учитывающей параметры резервуара и геометрические размеры скважины, оценивается инерционный эффект водообмена для двух скважин, расположенных в сейсмоактивных районах Камчатки и Хабаровского края. Показано удовлетворительное соответствие результатов теоретического моделирования с экспериментальными данными по барометрическому и приливному отклику уровней воды в скважинах.

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение коровой деформации под влиянием земных приливов и сейсмотектонических процессов может вызывать вариации давления подземных вод, которые проявляются в изменениях уровней воды в пьезометрических скважинах. Отсюда следует возможность использования вариаций уровня воды для контроля коровой деформации водовмещающих пород. Вместе с тем, определенные сложности выделения сигналов коровой деформации из вариаций уровня воды возникают из-за искажения отклика порового давления за счет водообмена между скважиной и контролируемым резервуаром подземных вод. При проведении гидрогеодинамического мониторинга в целях оценки сейсмотектонической деформации необходимо учитывать эффект инерционности водообмена для каждой наблюдательной скважины.

При развитии приливных и медленных сейсмотектонических деформаций течением воды в совершенно изолированных резервуарах подземных вод можно пренебречь, так как большой пространственный радиус действия таких деформаций предполагает отсутствие горизонтальных градиентов порового давления. Кроме этого, при совершенной изоляции резервуара слабопроницаемыми породами вертикальное течение подземных вод также можно исключить. В этом случае для любого периодического (сейсмического, приливного) возму-

щения 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

$$x_0 = p_0 / \rho g = h_0, \quad (1)$$

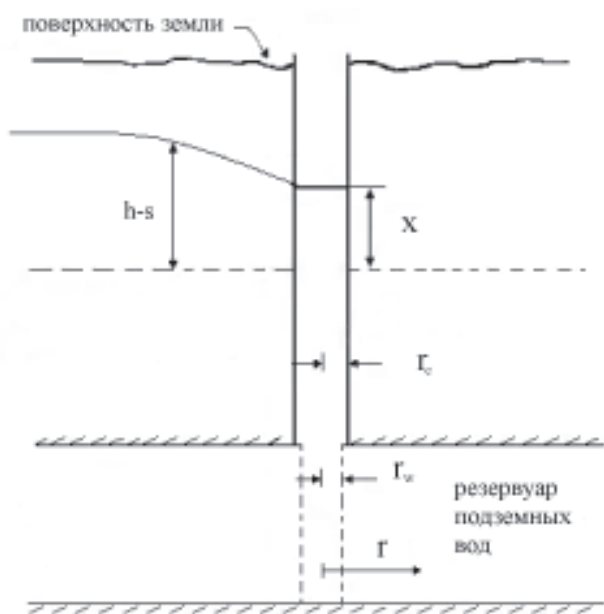
где  $\rho$  - плотность жидкости, и  $g$  - гравитационное ускорение.

Если рассматривать ситуацию с периодически изменяющимся поровым давлением в резервуаре, то на достаточно коротких периодах колебаний 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 (1), и будет запаздывать по отношению к пику напора в резервуаре  $h_0$ . Соотношение между уровнем воды в скважине и напором в резервуаре выражается через понижение напора  $s$  (рис. 1). В этом случае амплитудное соотношение (соотношение между амплитудой изменений уровня воды в скважине и амплитудой изменения гидростатического напора в резервуаре) определяется как (Cooper et al., 1965; Hsieh et al.; 1987; Roeloffs, 1988)

$$A = x_0 / h_0, \quad (2)$$

а фазовый сдвиг определяется как

$$\eta = \arg(x_0 / h_0). \quad (3)$$



**Рис. 1.** Схема формирования отклика уровня воды в скважине на гармонические вариации порового давления в изолированном резервуаре:  $r$  – горизонтальное расстояние от центра скважины;  $r_w$  – радиус скважины в области ее связи с резервуаром;  $r_c$  – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды;  $h$  – изменение гидростатического напора в резервуаре;  $s$  – понижение напора в резервуаре (положительное направление вниз);  $x$  – изменение уровня воды.

Определение зависимости параметров  $A$  и  $\eta$  от периода вариаций порового давления с учетом свойств водовмещающих пород и геометрии скважины характеризует степень инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод.

В (Шестаков, 1973; Основы..., 1983) представлено дифференциальное уравнение развития воронки депрессии при понижении уровня воды в скважине в условиях плоско-радиальной фильтрации, возникающей в напорном изотропном и неограниченном резервуаре подземных вод вследствие водообмена между скважиной и вскрытым резервуаром (рис. 1):

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} = 0, \tag{4}$$

где  $s$  – понижение напора в резервуаре;  $S$  – упругая емкость резервуара;  $T$  – коэффициент водопроницаемости;  $r$  – горизонтальное расстояние от центра скважины.

Гармонические колебания напора в резервуаре и уровня воды в скважине описываются уравнениями:

$$h = h_0 \exp(i\omega t), \tag{5}$$

$$x = x_0 \exp(i\omega t), \tag{6}$$

где  $h$  – изменение гидростатического напора в резервуаре подземных вод;  $h_0$  – комплексная амплитуда изменений гидростатического напора;  $x$  – смещение уровня воды от статического положения;  $x_0$  – комплексная амплитуда смещения уровня воды,  $i = (-1)^{1/2}$ ;  $t$  – время;  $\omega = 2\pi/\tau$  – частота волны;  $\tau$  – период волны.

На основе аналитического решения уравнения (4) в (Cooper et al., 1965) приводится выражение для амплитудного соотношения между вариациями уровня воды и напором в резервуаре на периодах, соответствующих сейсмическим волнам (единицы – десятки секунд), а в (Hsieh et al., 1987) приводятся выражения для амплитудного соотношения и фазового сдвига для более низкочастотного диапазона периодов, включающих барометрические и приливные деформации. В обоих случаях принималось, что периодическое возмущение гидростатического напора в резервуаре подземных вод вызывает течение воды между скважиной и резервуаром с расходом

$$Q = \pi r_c^2 \frac{dx}{dt} = i\omega x_0 \pi r_c^2 \exp(i\omega t), \tag{7}$$

где  $r_c$  – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды.

Этот расход воды вызывает понижение напора в резервуаре  $s$  (положительное направление вниз), которое накладывается на вариации порового давления (рис. 1). В отсутствие инерционного эффекта изменение уровня воды и гидростатического напора связано отношением:

$$x = h - s_w, \tag{8}$$

где  $s_w$  – понижение уровня воды в скважине вследствие периодического расхода воды  $Q$  между скважиной и резервуаром.

Выражения для периодического понижения уровня воды в скважине, амплитудного соотношения и фазового сдвига с учетом водопроницаемости, упругих свойств резервуара и размеров ствола скважины, имеют вид (Hsieh et al., 1987):

$$s_w = -\frac{\omega r_c}{2T} \{ [\psi \text{Ker}(\alpha_w) + \phi_w \text{Kei}(\alpha_w)] - i[\phi_w \text{Ker}(\alpha_w) - \psi \text{Kei}(\alpha_w)] \} \exp(i\omega t), \tag{9}$$

где

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

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

с действительной и мнимой частями функций Кельвина нулевого порядка  $\text{Ker}(\alpha_w)$ ,  $\text{Kei}(\alpha_w)$  и пер-

вого порядка  $Ker_f(\alpha_w)$ ,  $Kei_f(\alpha_w)$ , а  $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$  – безразмерная функция частоты, выраженная через параметры резервуара  $S$  и  $T$  и радиус скважины в области ее связи с резервуаром  $r_w$ ;

$$A = x_0/h_0 = (E+iF)^{-1} = (E^2+iF^2)^{-1/2}, \quad (10)$$

$$\eta = \arg(x_0/h_0) = -\tan^{-1}(F/E), \quad (11)$$

где

$$E = 1 - \beta_w [\psi Ker(\alpha_w) + \phi_w Kei(\alpha_w)],$$

$$F = \beta_w [\phi_w Ker(\alpha_w) - \psi Kei(\alpha_w)],$$

а  $\beta_w = \omega r_c^2 / 2T$  безразмерная функция частоты, выраженная через коэффициент водопроницаемости  $T$  и радиус скважины в области колебаний уровня воды  $r_c$ .

Приведенные выше выражения связывают искажение амплитуды изменения уровня воды и фазового сдвига по отношению к периодическим изменениям порового давления с величинами коэффициента водопроницаемости  $T$ , упругой емкости резервуара  $S$ , геометрическими параметрами скважины.

В (Cooper et al., 1965; Hsieh et al., 1987) показано, что теоретические зависимости амплитудного соотношения и фазового сдвига могут использоваться для оценки водопроницаемости резервуара подземных вод. В настоящей работе проводится оценка соответствия теоретической модели инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод с изменением амплитудно-частотных передаточных функций от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды и приливного отклика уровня воды в двух глубоких скважинах, расположенных в сейсмоактивных районах Дальнего Востока. Для этого используются величины параметров резервуаров – водопроницаемости  $T$ , полученные по данным откачек; упругие емкости  $S$ , оцененные по величинам дренированной сжимаемости скелета и флюида, пористости и вскрытой мощности водовмещающих пород на основе предположения о ста-

тически изолированных условиях в резервуарах на периодах от первых десятков часов и более (Rojstaczer, Agnew, 1988; Копылова, Болдина, 2006).

### ОЦЕНКА ИНЕРЦИОННОГО ЭФФЕКТА ВОДООБМЕНА МЕЖДУ СКВАЖИНОЙ И РЕЗЕРВУАРОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИН ЮЗ-5, КАМЧАТКА И БЫЧИХА, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ

Наблюдения на скважине ЮЗ-5 проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН. Данные наблюдений на скважине Бычиха получены Хабаровским производственным геологическим управлением и любезно предоставлены В.А. Бормотовым. Характеристика наблюдательных скважин представлена в табл. 1. Графики изменений уровня воды и атмосферного давления приводятся в (Копылова, 2005; Копылова, Бормотов, 2004).

Высокая чувствительность регистрации уровня воды в скважине ЮЗ-5 (0.1 см) и атмосферного давления (0.2 гПа) обеспечивается использованием цифрового регистратора Кедр-А2, оборудованного ультразвуковым датчиком уровня воды и датчиком атмосферного давления. Уровень воды в скважине Бычиха регистрировался с помощью механического поплавкового самописца «Валдай» с точностью 1 см. Атмосферное давление записывалось с помощью барографа (точность регистрации 1 гПа).

Оценим величину искажений отклика уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха на гармонические вариации порового давления на основании рассмотренной выше теоретической модели, результатов приливного и барометрического анализа откликов уровня воды в скважинах и применения формул теории пороупругости для статически изолированных условий (Копылова, Болдина, 2006; Igarashi, Wakita, 1991).

По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважинах могут оцениваться упругие параметры резервуара и пористость водовмещающих пород для изолированных резервуаров по величинам барометрической эффективности  $E_b$  и

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин ЮЗ-5 и Бычиха

Скважина	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.						
ЮЗ-5	53.17	158.41	800 310-800	1.5	алевролиты K <sub>2</sub>	холодный пресный	Кедр А2 10 мин	26.05.03 – 5.11.03
Бычиха	48.30	134.47	1150 926-1023	+0.5	сланцы, песчаники Тг	холодный пресный	Валдай 1 ч	01.07.97- 31.12.97

приливной чувствительности вариаций уровня воды  $A_s$  (Копылова, Болдина, 2006; Копылова, Бормотов, 2004).

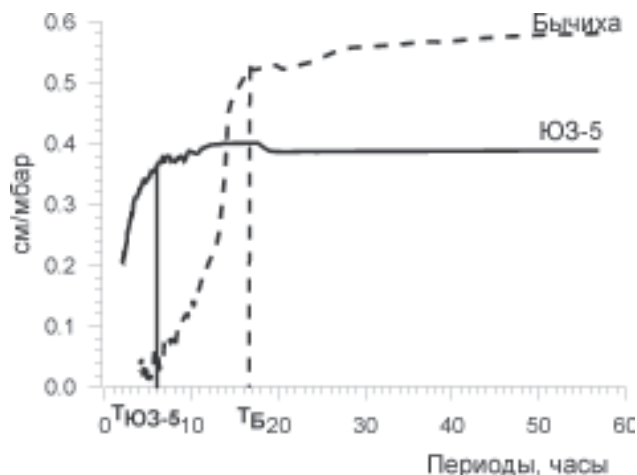
Для скважин ЮЗ-5 и Бычиха барометрическая эффективность  $E_b$  оценивалась методом кросс-спектрального анализа по амплитудным частотным передаточным функциям (АЧПФ) от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды, которые характеризуют изменение барометрической эффективности в зависимости от периода вариаций (рис. 2).

Для скважины ЮЗ-5 наблюдается увеличение величины  $E_b$  от 0.2 до 0.37 см/мбар в диапазоне периодов от 2 до 6 ч. На периоде 6 ч достигается максимальная величина  $E_b = 0.37$  см/мбар, которая остается постоянной на периодах до суток - первых десятков суток (рис. 2).

Для скважины Бычиха наблюдается устойчивый рост величины  $E_b$  на периодах от 5 до 16 ч. На периоде 16 ч достигается максимальная величина  $E_b = 0.50$  см/мбар, которая, также как и для скважины ЮЗ-5, остается постоянной на периодах до суток - первых десятков суток (рис. 2). Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха составляет примерно  $180^\circ$  во всем рассматриваемом диапазоне периодов. Это указывает на хорошую изоляцию резервуаров перекрывающими породами и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод, искажающих барометрический отклик (Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988).

Отсутствие барометрического отклика на периодах 2-5 ч для скважины Бычиха обусловлено, в первую очередь, грубой регистрацией уровня воды и атмосферного давления и невозможностью проследить барометрический отклик на высоких частотах. Частотная зависимость барометрического отклика на периодах 2-6 ч для скважины ЮЗ-5 и на периодах 5-16 ч для скважины Бычиха может быть обусловлена инерционными эффектами течения воды в скважину и из скважины, а также, возможно, нестационарностью процесса формирования барометрического отклика в относительно высокочастотной области.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды – выделенных амплитуд в изме-



**Рис. 2.** Амплитудно-частотные передаточные функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха.  $T_{ЮЗ-5}$  – минимальный период стабилизации АЧПФ для скважины ЮЗ-5 (6 ч);  $T_b$  – то же для скважины Бычиха (16 ч).

нениях уровня воды, амплитудных факторов (эквивалентных величинам  $A_s$ ), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и соответствующей фазой приливного потенциала для отдельных волн производилась по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994). В табл. 2 приводятся параметры приливного отклика уровня воды для мощных волн  $O_1$  (период 25.82 ч) и  $M_2$  (период 12.42 ч), которые определяются при отношении сигнал/шум 40 ( $O_1$ ) и 29 ( $M_2$ ) для скважины Бычиха; 185 ( $O_1$ ) и 391 ( $M_2$ ) для скважины ЮЗ-5.

Различия в величинах амплитудных факторов для двух волн могут быть вызваны особенностями формирования приливного отклика в различных частотных диапазонах для отдельных скважин, а также возможным искажением приливных амплитуд в изменениях уровня воды при воздействии океанического прилива, в котором присутствуют волны, имеющие такие же периоды, но отличающиеся по фазе. В табл. 3 представлены средние величины приливной чувствительности  $A_s$ , которые представляются наиболее приемлемыми в качестве характеристики деформметрической чувствительности уровня воды для скважин во всем диапазоне приливных периодов (Копылова, Болдина, 2006).

**Таблица 2.** Параметры приливного отклика уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха по волнам  $O_1$  и  $M_2$ , полученные по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994)

Скважина	Амплитудный фактор, см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град	Амплитуда уровня воды, см	$M_2$		$O_1$	
				Амплитудный фактор, см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град	Амплитудный фактор, см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град
ЮЗ-5	0.08 ± 0.001	-159.53 ± 0.15	0.89	0.11 ± 0.001	-173.61 ± 0.31	1.30	
Бычиха	0.13 ± 0.004	-169.7 ± 2.0	1.62	0.14 ± 0.004	-90.5 ± 1.4	1.59	

**Таблица 3.** Параметры барометрического и приливного откликов уровня воды в скважинах ЮЗ -5 и Бычиха

Скважина	Барометрический отклик		Приливной отклик
	Минимальный период стабилизации АЧПФ, ч	Барометрическая эффективность, см/мбар	Приливная чувствительность, см/10 <sup>-9</sup> об. деформации
ЮЗ-5	6	0.37	0.100
Бычиха	16	0.50	0.135

На основании гипотезы о статически изолированных условиях в резервуарах, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и Бычиха, и оцененных величин  $E_b$  и  $A_s$  рассчитаны параметры резервуаров - дренированная сжимаемость  $\beta$ , модуль сдвига  $G$ , коэффициент Скемптона  $B$ , удельная упругая емкость  $S_s$  и пористость  $\phi$  (Копылова, Болдина, 2006) (табл. 4).

Величина упругой емкости резервуаров оценивалась по формуле

$$S = S_s d, \tag{12}$$

где  $d$  - суммарная мощность зон водопритока. Для обеих скважин принималось  $d = 100$  м. Отсюда величины  $S$  составляют  $18.7 \cdot 10^{-5}$  для резервуара, вскрытого скважиной ЮЗ-5, и для скважины Бычиха -  $8.4 \cdot 10^{-5}$ . При радиусах скважин  $r_w = 0.084$  м и  $r_c = 0.123$  м (скважина ЮЗ-5),  $r_w = 0.0445$  м и  $r_c = 0.084$  м (скважина Бычиха),

При соответствующих значениях  $k$  или  $T/r_c^2$ , на периодах секунды – минуты, вариации уровня воды в скважинах по отношению к изменениям напора в резервуаре подобны низкочастотным фильтрам с малыми величинами амплитудного соотношения  $A (\leq 0.2)$ . С увеличением периодов в диапазоне примерно от 30 минут до часов наблюдается рост величины  $A$  с достижением максимального значения ( $A = 1$ ), при котором инерционный эффект водообмена между скважиной и резервуаром практически не влияет на связь между вариациями напора и уровня воды.

Наблюдается хорошее соответствие между теоретическими оценками максимальных периодов проявления эффекта инерционности водообмена и поведением АЧПФ, между вариациями атмосферного давления и изменениями уровня воды для обеих скважин (рис. 2-4). Для скважины ЮЗ-5 достижение величины  $A = 1$  происходит на периоде ~6 ч, а для скважины

**Таблица 4.** Оценка упругих параметров и пористости резервуаров подземных вод, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и Бычиха, при сжимаемости твердой матрицы скелета  $\beta_i$   $0.3 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> (кварц)

Скважина	Барометрическая эффективность $E_b$ , см/мбар	Приливная чувствительность $A_s$ , м/10 <sup>-7</sup>	Дренированная сжимаемость скелета $\beta$ , Па <sup>-1</sup> ·10 <sup>-11</sup>	Модуль сдвига $G$ , Па·10 <sup>10</sup>	Коэффициент Скемптона $B$	Удельная упругая емкость резервуара $S_s$ , м <sup>-1</sup> ·10 <sup>-7</sup>	Пористость $\phi$
ЮЗ-5	0.37	0.100	13.8	0.43	0.68	18.7	0.12
Бычиха	0.50	0.135	6.1	0.99	0.57	8.4	0.06

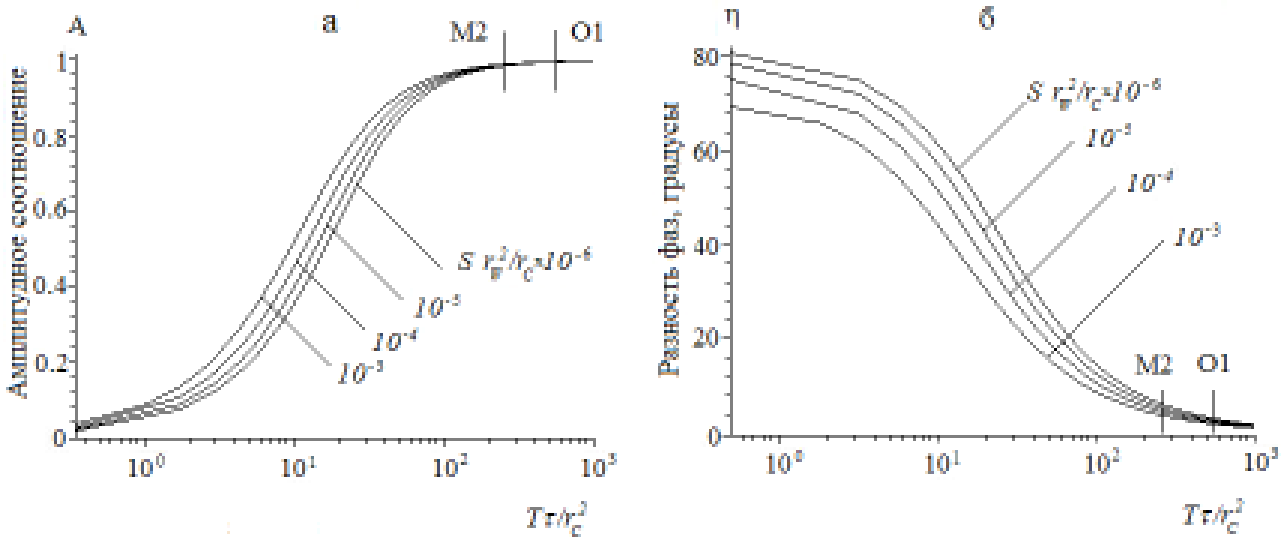
суммарной мощности зон водопритока  $d = 100$  м и заданных величинах коэффициента фильтрации  $k$  от  $2 \cdot 10^{-9}$  м/с до  $2 \cdot 10^{-6}$  м/с (Van der Kamp, Gale, 1983) получаем оценку для параметра  $T/r_c^2 = 1.3 \cdot 10^{-5} - 1.3 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup> (скважина ЮЗ-5) и  $2.8 \cdot 10^{-5} - 2.8 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup> (скважина Бычиха).

По данным откачек величина  $T/r_c^2$  для скважины ЮЗ-5 составляет  $6 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>, а для скважины Бычиха –  $5.6 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>. Эти величины находятся в соответствующих диапазонах значений, полученных по приливному и барометрическому откликам уровня воды.

Графики амплитудного соотношения  $A$  (10) и сдвига фаз  $\eta$  (11) при различных значениях  $T/r_c^2$  и  $Sr_w^2/r_c^2$  для скважины ЮЗ-5 представлены на рис. 3, а для скважины Бычиха - на рис. 4.

Бычиха - ~16 ч. Теоретические периоды примерно соответствуют минимальным периодам стабилизации АЧПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды для соответствующих скважин ( $T_{ЮЗ-5}$  и  $T_B$  на рис. 2) и показывают определенную связь частотной зависимости барометрического отклика уровня воды в области малых периодов от параметров инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод.

На длинных периодах, соответствующих приливным воздействиям, величина  $A$  приближается к 1, т. е. в этом диапазоне искажение отклика уровня воды на изменение порового давления практически не ожидается в скважине ЮЗ-5. Для скважины Бычиха на периоде волны



**Рис. 3.** Графики изменений сдвига при различных значениях  $T\tau/r_c^2$  и  $Sr_w^2/r_c^2$  для скважины ЮЗ-5:  
 а - амплитудное соотношение между изменениями уровня воды в скважине и напора в резервуаре;  
 б - фазовое запаздывание.

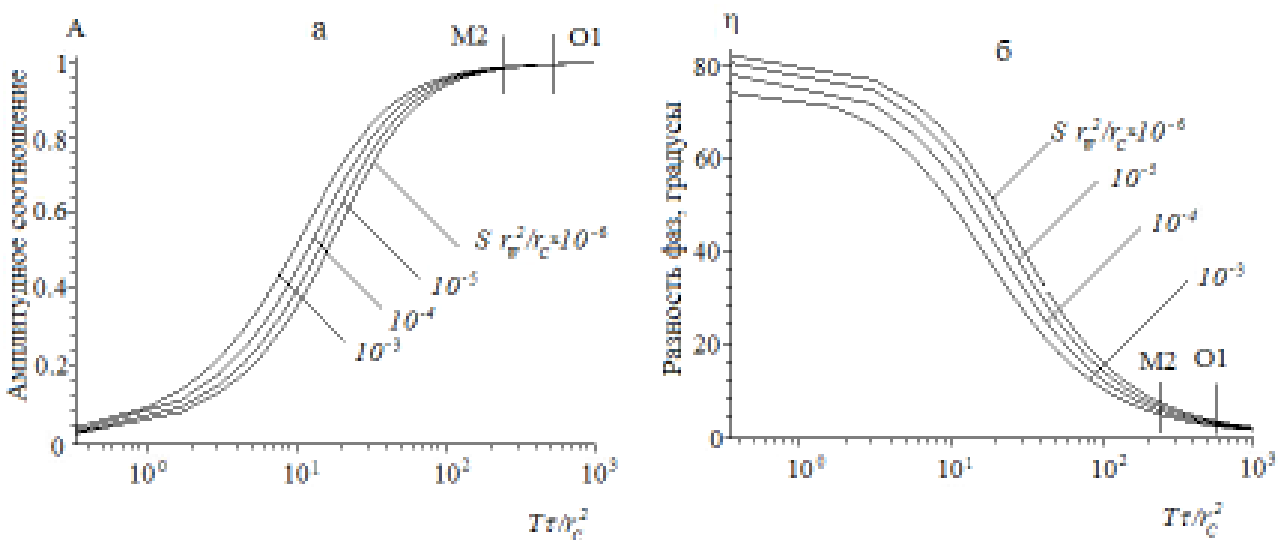
$M_2$  величина  $A$  составляет 0.98, а для периодов волн суточной группы величина амплитудного соотношения равна 1.

Фазовое искажение  $\eta$  на малых периодах ( $\tau \leq 1$  мин) достигает  $75^\circ$  для скважины ЮЗ-5 и  $77^\circ$  для скважины Бычиха. На длинных периодах сдвиг фаз между вариациями гидростатического напора в резервуаре и вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 составляет для волн  $M_2 \approx 4^\circ$ ,  $O_1 \approx 3^\circ$  (рис. 3б), а для скважины Бычиха -  $M_2 \approx 5^\circ$ ,  $O_1 \approx 3^\circ$  (рис. 4б).

В диапазоне приливных периодов  $\tau \approx 12-27$  ч величины амплитудного соотношения для обеих

скважин  $A = x_0/h_0 \approx 1$  при величинах параметра  $T\tau/r_c^2$  более  $10^2$  (рис. 3а, рис. 4а), а теоретическое фазовое запаздывание  $\eta$  не превышает  $7^\circ$  (рис. 3б, рис. 4б). Для периодов приливных волн  $M_2$  ( $\tau \approx 12.42$  ч) и  $O_1$  ( $\tau \approx 25.82$  ч) параметр  $T\tau/r_c^2$  систематически больше 200 (параметр  $T\tau/r_c^2$  для волны  $M_2$  равен  $\sim 268$  для скважины ЮЗ-5 и  $\sim 253$  для скважины Бычиха; для волны  $O_1$  -  $\sim 557$  для скважины ЮЗ-5 и  $\sim 526$  для скважины Бычиха) (рис. 3, 4).

Полученные зависимости амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха и изменениями по-



**Рис. 4.** Графики изменений сдвига при различных значениях  $T\tau/r_c^2$  и  $Sr_w^2/r_c^2$  для скважины Бычиха:  
 а - амплитудное соотношение между изменениями уровня воды в скважине и напора в резервуаре;  
 б - фазовое запаздывание.

рового давления служат косвенным подтверждением правильности приведенных оценок порупругих параметров резервуаров, вскрытых скважинами, на относительно длинных периодах (табл. 4).

Для статически изолированных условий в резервуаре выполняется линейная зависимость изменений порового давления  $\Delta p$  от изменения объемной деформации водовмещающих пород  $\Delta \varepsilon$  (Roeloffs, 1988):

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1+\nu_u)/(1-2\nu_u)]\Delta \varepsilon. \quad (13)$$

Если в (13) подставить величины теоретической приливной деформации для волн  $M_2$  ( $10.18 \cdot 10^{-9}$  для скважины ЮЗ-5;  $12.46 \cdot 10^{-9}$  для скважины Бычиха) и  $O_1$  ( $10.97 \cdot 10^{-9}$  для скважины ЮЗ-5;  $11.27 \cdot 10^{-9}$  для скважины Бычиха), вычисленные величины коэффициента Скемптона  $B$ , модуля сдвига  $G$  (табл. 4) и принятую величину недренированного коэффициента Пуассона  $\nu_u = 0.3$ , то можно оценить ожидаемые теоретические амплитуды приливных вариаций порового давления  $\Delta p$  в резервуарах, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и Бычиха, без существенного искажения за счет инерционного эффекта водообмена.

Перевод величин  $\Delta p$  в эквивалентные амплитуды изменения уровня воды  $\Delta h$  показывает, что в скважине ЮЗ-5 для волны  $M_2$  ожидается теоретическая амплитуда изменения уровня 0.49 см,  $O_1$  – 0.8 см, а в скважине Бычиха для волны  $M_2$  – 1.55 см,  $O_1$  – 1.41 см.

Расчетные величины по (13) для скважины ЮЗ-5 меньше на 0.4-0.5 см соответствующих амплитуд, полученных из приливного анализа. Т.е. в случае скважины ЮЗ-5 различие в оценках теоретических амплитуд и амплитуд, полученных из приливного анализа экспериментальных данных, составляет порядка 50%.

Для скважины Бычиха по волне  $M_2$  теоретическая амплитуда на 0.07 см меньше амплитуды, полученной по приливному анализу, и по волне  $O_1$  – меньше на 0.18 см (табл. 2). С учетом неопределенности, заложенной в алгоритме определения упругих параметров резервуара, различие в 4-11% для теоретических и экспериментальных приливных амплитуд представляется вполне приемлемым.

Не более определенной является и правильность соответствия между теоретическим фазовым сдвигом  $\eta$  (менее  $6^\circ$ ) и величинами разности фаз между расчетным земным приливом и изменениями уровня воды в скважинах. В случае вскрытия скважиной изолированного резервуара, при отсутствии инерционных эффектов водообмена и без учета океанической нагрузки, разность фаз между приливной волной и изме-

нением уровня воды должна составлять  $180^\circ$ . Отсюда можно оценить запаздывание для хорошо выделяемых волн в скважине ЮЗ-5 –  $O_1$  ( $6^\circ$ ),  $M_2$  ( $20^\circ$ ) и в скважине Бычиха –  $O_1$  ( $90^\circ$ ),  $M_2$  ( $10^\circ$ ) (табл. 2).

Полученное несоответствие для волны  $M_2$  в скважине ЮЗ-5 на  $\sim 16^\circ$ , скорее всего, связано с недоучетом влияния океанического прилива на изменение уровня воды в скважине (скважина ЮЗ-5 расположена примерно в 15 км от берега Авачинской бухты), 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 уровнемерных и деформометрических наблюдений на этой скважине с учетом океанического приливного воздействия.

Для скважины Бычиха получено хорошее соответствие разности фаз для волны  $M_2$  по теоретической модели и по экспериментальным данным. Вместе с тем, увеличение фазового сдвига приливных вариаций уровня воды по волне  $O_1$  (до  $90^\circ$ ) может свидетельствовать о невысоком качестве данных наблюдений, полученных с помощью механического записывающего устройства, или о неполном соответствии модели статически изолированного отклика уровня воды на периоде волны  $O_1$  реальным условиям в резервуаре. Т. к. мы полагаем, что причина получения такого большого фазового сдвига по волне  $O_1$  все же заключается в невысоком качестве данных, то представляется целесообразным организация цифровой регистрации уровня воды и атмосферного давления на этой скважине для уточнения параметров приливного отклика уровня воды.

## ВЫВОДЫ

1. На основе модели Hsieh et al., 1987 построены теоретические зависимости отклика уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Бычиха на периодические изменения порового давления во вскрытых резервуарах подземных вод в диапазоне минутных и часовых периодов, учитывающие геометрию скважин, упругие и фильтрационные параметры резервуаров, инерционный эффект водообмена между скважинами и резервуарами подземных вод.

2. Установлено, что на периодах более 6 ч для скважины ЮЗ-5 и более 16 ч для скважины Бычиха амплитудное соотношение между вариациями напора в резервуаре и изменениями уровня воды в скважине практически равно единице. Отсюда следует, что для скважины ЮЗ-5 инерционный эффект водообмена не оказывает су-

ществленного влияния на амплитуду проявления приливного отклика в изменениях уровня воды. Для скважины Бычиха в диапазоне приливных периодов эффектом водообмена можно пренебречь, т.к. амплитудное соотношение между вариациями напора в резервуаре и изменениями уровня воды в скважине составляет 0.98-0.99.

3. Результаты моделирования согласуются с изменением амплитудно-частотных передаточных функций от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в обеих скважинах и показывают, что на периодах, соответствующих диапазону действия приливных и медленных сейсмоструктурных вариаций напряженно-деформированного состояния среды (десять часов - сутки), искажение отклика уровня воды в скважинах на изменения порового давления не ожидается.

Для проверки соответствия теоретической модели по фазовому сдвигу необходимо проведение синхронной регистрации уровня воды и приливных деформаций в районе скважины.

#### Список литературы

- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважинах под влиянием землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 113-126.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17-28.
- Копылова Г.Н., Бормотов В.А.* Эффекты сейсмичности в изменениях уровней воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер. Матер. VI междунар. междисциплинар. научн. симпоз. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 134 – 149.
- Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
- Шестаков В.М.* Динамика подземных вод. М.: МГУ, 1973. 327 с.
- 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.
- Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J.* Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.
- Roeloffs E.A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177-209.
- 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 // BIM. 1994. № 118. P. 8719-8721.

## ESTIMATION OF THE INERTIAL EFFECT ON FLOW FROM AN UNDERGROUND WATER RESERVOIR TO A WELL

**S. V. Boldina, G. N. Kopylova**

*Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science*

On the basis of the theoretical model of water level changes in the well at periodical variations of pore pressure in the groundwater reservoir considered parameters of reservoir and geometrical parameters of the well, inertia effect of the flow between the well and groundwater reservoir is estimated for two wells located in Kamchatka and Khabarovsk seismic areas. The theoretical result is in reasonable accordance with experimental data obtained by the barometric and tidal responses of water level in the wells.