

УДК 550.832.9:556.34.042

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОЦЕНОК УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИХ СКВАЖИНАХ

© 2013 С.В. Болдина, Г.Н. Копылова

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

Рассматриваются способы обработки данных уровнемерных наблюдений в скважинах для получения оценок упругих параметров водовмещающих пород с использованием величин барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды. Условием в применении рассматриваемого метода является наличие статически изолированного отклика уровня воды в скважине в диапазоне часовых периодов. Такой отклик уровня воды может проявляться в диапазоне периодов часы – первые десятки суток в скважинах, вскрывающих напорные подземные воды без газа в относительно слабопроводящих водовмещающих породах на глубинах порядка первых сотен метров и более. Для таких скважин можно получить величины сжимаемости скелета породы и коэффициента Скемптона с использованием формул теории пороупругости. При этом оценки величин пористости и удельной упругой емкости водовмещающих пород будут иметь приблизительный характер.

*Ключевые слова: скважина, уровень воды, барометрическая эффективность, приливная чувствительность, сжимаемость.*

### ВВЕДЕНИЕ

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах, расположенных в сейсмоактивных регионах, рассматриваются как информативный компонент системы геофизического мониторинга, направленного на обнаружение признаков активизации современных геодинамических процессов, в том числе подготовки сильных землетрясений. Использование уровнемерных данных в указанных целях основывается на представлении о том, что гидродинамический режим подземной гидросферы является достаточно чувствительным к изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород при сеймотектонических воздействиях. Вместе с тем, опыт уровнемерных наблюдений показывает существенную неравнозначность отдельных скважин по их способности отражать в изменениях уровня воды сигналы современной геодинамической активности (Копылова, 2009).

Если скважина вскрывает однородные слабопроницаемые водовмещающие породы, в которых

течением воды можно пренебречь в некотором диапазоне периодов, то вариации уровня воды в такой скважине могут без существенных искажений отражать в соответствующем диапазоне периодов изменения порового давления при деформировании водовмещающих пород. В этом случае реакция уровня воды на деформацию будет определяться упругими параметрами контролируемого скважиной гидрогеологического подразделения.

В качестве основных упругих параметров водовмещающих пород можно рассматривать (Rojstaczer, Agnew, 1989):

- сжимаемость минерального скелета породы в условиях оттока воды (дренированные условия)  $\beta$ , характеризующую способность горной породы изменяться в объеме под действием изменяющегося всестороннего напряжения;

- коэффициент Скемптона  $B$ , показывающий долю суммарного напряжения в скелете водовмещающей породы, передающуюся на воду в условиях полного заполнения порово-трещинного пространства;

- удельную упругую емкость  $S_s$ , равную из-

менению объема воды, отнесенному к объему водовмещающей породы, при единичном изменении напора;

– пористость  $\phi$ , выражающую отношение объема всех пустот (пор и трещин) к общему объему водовмещающей породы в долях единицы или процентах.

Неискаженный отклик уровня воды в скважине на деформацию водовмещающих пород ограничивается диапазоном периодов проявления статических условий водообмена между стволом скважины и водовмещающей породой, когда можно пренебречь влиянием гидродинамических процессов в потоке подземной воды и инерционностью водообмена между скважиной и водовмещающей породой. Такие условия называются статически изолированными и, соответственно, отклик уровня воды на различные геодинамические воздействия также называется статически изолированным или ограниченным (static confined response (Hsieh et al., 1987; Rojstaczer, Agnew, 1989)).

Статически изолированный отклик уровня воды может проявляться в широком диапазоне периодов от минут до суток – десятков и сотен суток, в зависимости от соотношения фильтрационных и упругих параметров водовмещающих пород и других факторов, в том числе строения скважины, степени гидродинамической изолированности контролируемого гидрогеологического подразделения, наличия скин-эффекта.

Развитие метода уровневых наблюдений для геофизического мониторинга предполагает разработку способов количественной оценки интенсивности современных геодинамических процессов, проявляющихся в аномальных вариациях уровня воды, в частности, изменений объемной деформации водовмещающих пород. Для этого необходимо иметь количественные оценки упругих параметров водовмещающих пород в районе скважин. Такая задача, обычно, возникает уже после того, как скважина пробурена, опробована и используется по целевому назначению (геофизический мониторинг), поэтому для ее решения полезно иметь метод определения упругих параметров водовмещающих пород без нарушения естественного гидродинамического режима скважины.

В отличие от эпизодического воздействия факторов современной геодинамической активности, приливные и барометрические воздействия вызывают постоянные изменения напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород и проявляются в закономерных откликах уровня воды (Копылова, 2006, 2009; Копылова, Болдина, 2006; Копылова и др., 2007).

В работах (Копылова, Болдина, 2006; Igarashi,

Wakita, 2001; Matsumoto, Roeloffs, 2003; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, Agnew, 1989) показано, что для оценки упругих параметров водовмещающих пород можно использовать экспериментально определенные величины барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды по данным уровневых наблюдений. Но такой метод оценивания упругих параметров водовмещающих пород имеет ограничения и не всегда может применяться. Поэтому среди многообразия гидрогеологических обстановок и особенностей формирования гидродинамического режима наблюдательных скважин следует определить условия, когда может применяться метод оценивания упругих параметров по данным уровневых наблюдений.

### ПРИМЕР ОБРАБОТКИ ДАННЫХ УРОВНЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА

Рассмотрим особенности обработки данных уровневых наблюдений на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка (рис.1). Характеристика скважины, системы уровневых наблюдений и основные результаты, в том числе обоснование наличия статически изолированного отклика уровня воды в диапазоне периодов часы – сутки и описание зарегистрированных вариаций уровня воды в связи с сильными землетрясениями, приводятся в работах (Копылова, 2006, 2009; Копылова, Болдина, 2006).

В вариациях уровня воды выделяется низкочастотная компонента (тренд) и высокочастотные компоненты, обусловленные, в основном, земноприливным воздействием и переменной барометрической нагрузкой (рис. 2а, второй график сверху).

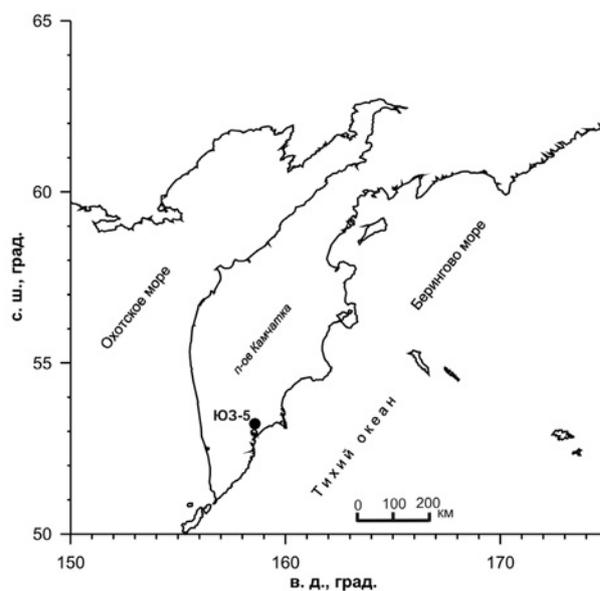


Рис. 1. Схема расположения скважины ЮЗ-5.

Изменения поверхностной барометрической нагрузки и приливы в твердой Земле являются постоянно действующими сигналами, изменяющими напряженно-деформированное состояние водовмещающих пород. Эти сигналы имеют существенные различия. Изменения атмосферного давления, так же, как и изменения уровня воды, представляют широкополосные сигналы, амплитуды которых увеличиваются с увеличением периода вариаций в диапазоне от минут до месяцев-лет.

Результаты кросс-спектрального анализа среднечасовых вариаций уровня воды и атмосферного давления (рис. 2б) показывают, что в диапазоне периодов от 2 до 6 ч наблюдается увеличение барометрического отклика уровня воды от нулевых значений до максимальной величины. В диапазоне периодов 6-100 ч барометрический отклик уровня постоянный и характеризуется величиной амплитудной передаточной функции 0.39 см/гПа, которую можно принять в качестве барометрической эффективности вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5.

Разность фаз между изменениями уровня воды и атмосферного давления в диапазоне постоянного значения амплитудной передаточной функции составляет  $-180^\circ$ . Это указывает на проявление неискаженного барометрического отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5 в диапазоне периодов от 6 ч до первых десятков суток.

При увеличении периодов вариаций уровня и атмосферного давления от 20 суток и более происходит уменьшение амплитудной передаточной функции от 0.4 до 0.3 см/гПа и менее. В этом диапазоне периодов также происходит уменьшение величины квадрата модуля спектра когерентности вариаций уровня и атмосферного давления от 0.8 до 0.2 и существенное отклонение разности фаз от величины  $-180^\circ$  (Копылова, 2009). Это обусловлено искажением барометрического отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5 на периодах более 20 сут за счет течения воды в водовмещающих породах и гидродинамического влияния процессов в области питания и разгрузки водоносной системы.

В отличие от широкополосного барометри-

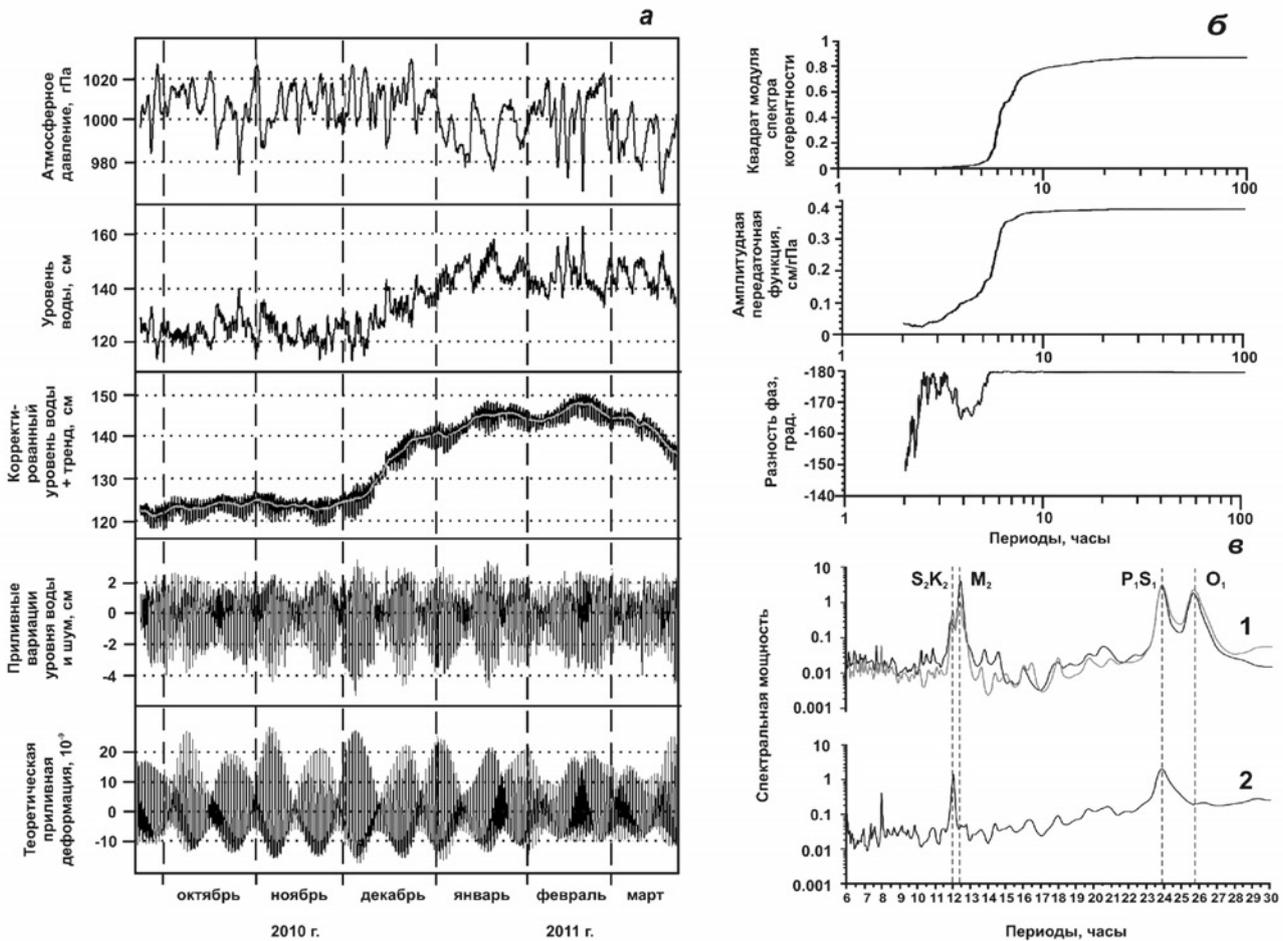


Рис. 2. Среднечасовые данные синхронных измерений уровня воды и атмосферного давления на скв. ЮЗ-5, Камчатка (сентябрь 2010-март 2011 гг.) в сопоставлении с изменением теоретической деформации водовмещающих пород (а) и результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления (б) (спектры мощности вариаций уровня воды (1): черная линия – наблюдаемые данные, серая линия – данные после компенсации баровариаций по алгоритму (Любушин, 1993)) и атмосферного давления (2) в диапазоне периодов 6-30 ч (в). Пояснения см. в тексте.

ческого воздействия, приливное воздействие в изменениях уровня воды характеризуется ограниченным набором локальных пиков в спектре мощности вариаций уровня воды, соответствующих отдельным волнам приливного гравитационного потенциала (рис. 2в, график 1). В спектре мощности вариаций уровня воды выделяются пики, соответствующие приливному волнам  $S_1K_1$  (12 ч),  $M_1$  (12.42 ч),  $P_1S_1$  (23.93 ч) и  $O_1$  (25.82 ч). В спектре среднечасовых вариаций атмосферного давления в рассматриваемом диапазоне периодов (6-30 ч) выделяются только два пика – ровно суточный (24 ч) и полусуточный (12 ч) (рис. 2в, график 2), которые обусловлены, главным образом, суточной периодичностью метеорологических процессов в атмосфере.

Результаты приливного анализа ряда среднечасовых значений уровня воды, очищенных от влияния баровариаций, показывают наличие в изменениях уровня не только четырех наиболее мощных волн, но и более слабых волн  $Q_1$  и  $N_2$ , которые определяются при отношении сигнал/шум  $\leq 10$  (табл. 1). Величины амплитудных факторов для пяти выделенных приливных волн (волна  $P_1S_1$  не рассматривается из-за сильной зашумленности компонент вариаций уровня воды с периодами близким к суточному периоду), оцененные по отношению к теоретической площадной деформации, составляют 0.090-0.142 см/10<sup>-9</sup>, в среднем, 0.115 см/10<sup>-9</sup>.

Регрессионная связь между приливыми амплитудами в изменениях уровня воды (H) и площадной деформацией (D) (рис. 3) описывается уравнением  $H = 0.104D + 0.034$  при величине коэффициента корреляции  $R = 0.93$ . Коэффициент регрессионного уравнения 0.104 см/10<sup>-9</sup> может

рассматриваться в качестве характерной величины приливной чувствительности уровня воды в диапазоне суточных и полусуточных приливных волн. Эту величину также можно использовать в качестве характеристики отклика уровня воды на изменение деформации водовмещающих пород (деформометрическая чувствительность уровня воды) в диапазоне периодов от 6 ч до первых десятков суток в соответствии с результатами кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления.

### БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ И ДЕФОРМОМЕТРИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ УРОВНЯ ВОДЫ

*Барометрическая чувствительность уровня воды* характеризует отклик системы «скважина – водовмещающая порода» на переменную вертикальную нагрузку на зеркало воды в скважине и на водовмещающую породу через перекрывающую толщу вследствие вариаций атмосферного давления и является частотно-зависимой.

Диапазон периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды может оцениваться по результатам кросс-спектрального анализа данных по изменениям уровня воды (выходной сигнал) и атмосферного давления (входной широкополосный сигнал). Характеристиками связи изменений уровня воды и атмосферного давления являются квадрат модуля спектра когерентности, амплитудная передаточная функция и изменение разности фаз в зависимости от величины периода (рис. 2б). По прямолинейному участку поведения амплитудной передаточной

**Таблица 1.** Результаты приливного анализа часовых вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994), период наблюдений 23.09.2010-23.03.2011 гг.

Волна, период, ч	Амплитуда площадной деформации, D, ед. · 10 <sup>-9</sup>	Амплитуда уровня воды, см	Отношение сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/10 <sup>-9</sup>	Фазовый сдвиг, град.
<b>Q<sub>1</sub>, 26.87</b>	<b>2.10</b>	<b>0.30</b>	<b>13.5</b>	<b>0.142±0.001</b>	<b>153.25±0.10</b>
<b>O<sub>1</sub>, 25.82</b>	<b>10.97</b>	<b>1.33</b>	<b>60.0</b>	<b>0.121±0.001</b>	<b>154.19±0.02</b>
M <sub>1</sub> , 24.83	0.86	0.09	4.1	0.105±0.003	174.81±0.18
P <sub>1</sub> S <sub>1</sub> , 23.93	15.43	1.18	53.2	0.076±0.001	161.26±0.01
J <sub>1</sub> , 23.10	0.86	0.11	5.1	0.130±0.004	149.82±0.25
OO <sub>1</sub> , 22.31	0.47	0.06	2.5	0.117±0.006	154.77±0.35
2N <sub>2</sub> , 12.87	0.31	0.04	7.6	0.139±0.009	152.92±0.55
<b>N<sub>2</sub>, 12.66</b>	<b>1.95</b>	<b>0.22</b>	<b>38.9</b>	<b>0.114±0.002</b>	<b>154.44±0.11</b>
<b>M<sub>2</sub>, 12.42</b>	<b>10.18</b>	<b>0.92</b>	<b>161.7</b>	<b>0.091±0.001</b>	<b>161.12±0.02</b>
L <sub>2</sub> , 12.19	0.29	0.02	3.2	0.064±0.016	170.33±0.93
<b>S<sub>2</sub>K<sub>2</sub>, 12.00</b>	<b>4.74</b>	<b>0.50</b>	<b>86.8</b>	<b>0.105±0.001</b>	<b>169.66±0.04</b>
M <sub>3</sub> , 8.28	0.04	0.01	3.2	0.256±0.077	-179.13±4.42

Примечание: полужирным шрифтом выделены приливные волны в изменениях уровня воды, определенные при отношении сигнал/шум >10 и используемые при оценке средней величины приливной чувствительности скважины.

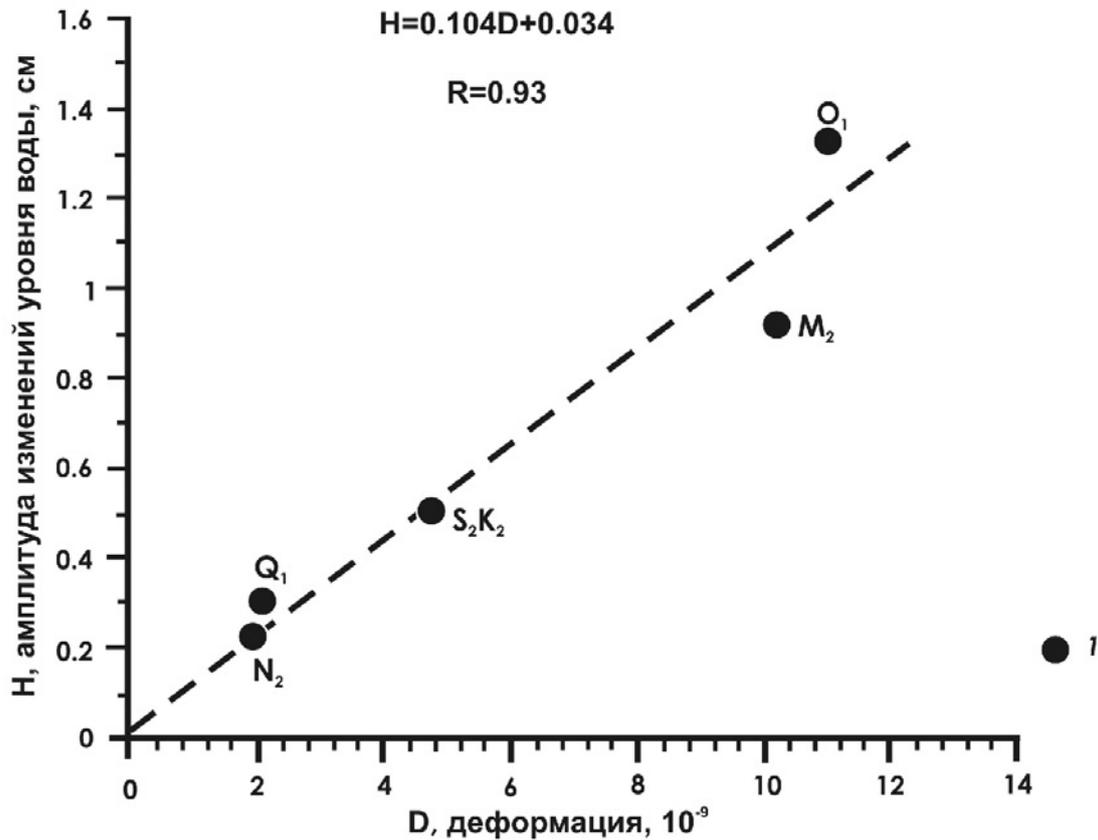


Рис. 3. Соотношение между выделенными амплитудами приливных волн в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 (H) и соответствующими теоретическими величинами площадной деформации (D): 1 – приливные волны.

функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды может оцениваться диапазон периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды для отдельной скважины (Копылова, 2006, 2009; Копылова, Болдина, 2006; Копылова и др., 2007; Igarashi, Wakita, 2001; Roeloffs, 1998) и соответствующая величина барометрической эффективности («static confined barometric efficiency»)

$$E_b = -dh_w/dh_b, \quad (1)$$

где  $dh_w$  – барометрическое изменение уровня воды, см;  $dh_b$  – изменение атмосферного давления, гПа (Болдина, Копылова, 2006; Igarashi, Wakita, 2001; Rojstaczer, Agnew, 1989). Знак минус в формуле (1) обозначает, что уровень воды в открытой скважине понижается при повышении атмосферного давления.

Для статически изолированных условий выполняется соотношение  $E_b = -(1-\alpha)$ , где  $\alpha$  – отношение изменений порового давления в водовмещающей породе к изменениям уровня воды в скважине или эффективность передачи поверхностной нагрузки на контролируемые скважиной водовмещающие породы («surface loading efficiency») (Rojstaczer, Agnew, 1989). Для скв. ЮЗ-5 величина  $\alpha = 0.61$  см/гПа.

Опыт уровнемерных наблюдений показыва-

ет, что статически изолированный отклик уровня на часовых – суточных периодах проявляется в скважинах, вскрывающих на глубинах не менее первых сотен метров напорные слабоминерализованные подземные воды без газа в водовмещающих породах с относительно низкими водопроводящими свойствами, характеризующимися величинами водопроводимости  $T = 0.05-50$  м<sup>2</sup>/сут (Копылова и др., 2007; Igarashi, Wakita, 2001; Matsumoto, Roeloffs, 2003). В таких скважинах может происходить искажение отклика уровня воды на изменения порового давления вследствие инерционности водообмена между скважиной и водовмещающей породой в диапазоне периодов секунды-минуты-первые часы. На больших периодах искажение отклика уровня воды может происходить из-за диссипации упругих импульсов порового давления течением воды.

Фактор инерционности водообмена между водовмещающей породой и стволом скважины на малых периодах необходимо учитывать для каждой наблюдательной скважины. В соответствии с моделью (Болдина, Копылова, 2006; Hsieh et al., 1987), проявление фактора инерционности определяется строением скважины и фильтрационными свойствами пород. Важную роль в этом процессе играет проницаемость при-

фильтровой зоны, т. к. при ее понижении фактор инерционности усиливается. Таким образом, чем выше проницаемость прифильтровой зоны и больше водопроницаемость, а также чем меньше диаметр ствола скважины и меньше масса воды в ее стволе, тем на меньших периодах вариаций порового давления следует ожидать искажающее влияние инерционности водообмена. Соответственно, полоса пропускания для проявления статически изолированного отклика уровня воды на деформацию водовмещающих пород будет расширяться в область малых периодов.

В области больших периодов, составляющих сутки-десятики суток и более, искажение и полное вырождение статически изолированного отклика уровня воды обусловлено воздействием на режим скважин комплекса естественных факторов, связанных с течением воды и влиянием условий питания и разгрузки в зоне гидродинамического влияния. Оценка верхней границы диапазона периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды может проводиться по уменьшению величин квадрата модуля спектра когерентности и амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (Копылова и др., 2007).

*Деформометрическая чувствительность уровня воды* может оцениваться по величине его приливной чувствительности, то есть по соотношению амплитуд отдельных приливных волн в изменениях уровня и соответствующих величин измеренной или теоретической деформации (Копылова, 2006; Копылова и др., 2007). Важным условием для этого является отсутствие влияния инерционности водообмена в диапазоне суточных и полусуточных приливных периодов (Hsieh et al., 1987). Например, для скв. ЮЗ-5 по результатам кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления искажающее влияние инерционности водообмена на барометрический отклик проявляется на периодах менее 6 ч (рис. 2б) (Болдина, Копылова, 2006). Поэтому для скв. ЮЗ-5 можно использовать оцененную величину приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  (рис. 3) в качестве деформометрической чувствительности во всем диапазоне проявления статически изолированного отклика уровня.

Отклик уровня воды на приливное воздействие характеризуется величинами чувствительности уровня воды по отношению к объемной приливной деформации  $A_v = -dh_t/\varepsilon$  или по отношению к площадной приливной деформации  $A_s = -dh_t/\varepsilon_t$ , где  $dh_t$  – амплитуда приливных изменений уровня воды,  $\varepsilon$  – объемная приливная деформация, где  $\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ , где  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_y$  – горизонтальные компоненты приливной деформации,  $\varepsilon_z$  – вертикальная компонента приливной

деформации;  $\varepsilon_t = \varepsilon_x + \varepsilon_y$  – площадная приливная деформация, (Копылова, Болдина, 2006; Igarashi, Wakita, 2001; Rojstaczer, Agnew, 1989).

Величины  $dh_t$  определяются по среднечасовым данным уровнемерных наблюдений длиной не менее одного месяца путем применения приливного анализа и определения амплитуд отдельных приливных волн. Пример определения амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды и соответствующих амплитудных факторов по отношению к теоретической деформации по программе приливного анализа ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994) приводится в табл. 1.

Ранее в работах (Igarashi, Wakita, 1991; Matsumoto, Roeloffs, 2003; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, 1988a; Rojstaczer, Agnew, 1989) предлагалось использовать в качестве величины приливной чувствительности уровня воды амплитудный фактор, определенный для волны  $M_2$ . Такой подход представляется не вполне оправданным из-за некоторого отличия величин амплитудных факторов для различных приливных волн и их суточных и полусуточных групп (табл. 1).

#### ОЦЕНКА СВЯЗИ УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И ВЕЛИЧИН $E_b$ И $A_s$

В работах (Копылова, Болдина, 2006; Копылова и др., 2007; Igarashi, Wakita, 2001; Matsumoto, Roeloffs, 2003; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, 1988a) дано описание 20-ти пьезометрических скважин в сейсмоактивных районах России, Японии и США, в которых проводились уровнемерные наблюдения (табл. 2). Скважины вскрывают напорные пресные подземные воды на глубинах от 50 до 860 м. Водовмещающие породы представлены осадочными, вулканогенно-осадочными и магматическими породами. По заключению авторов (Копылова, Болдина, 2006; Копылова и др., 2007; Igarashi, Wakita, 2001; Matsumoto, Roeloffs, 2003; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, 1988a) все эти скважины характеризуются наличием статически изолированного отклика уровня воды на барометрическое и приливное воздействие в диапазоне периодов часы-сутки.

Для этих скважин с использованием кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня и атмосферного давления определялись величины барометрической эффективности ( $E_b = 0.12-0.80$  см/гПа) и величины площадной приливной чувствительности уровня воды ( $A_s = 0.010-0.143$  м/10<sup>-7</sup>) (табл. 2).

Выражения, описывающие связь упругих параметров  $\beta$ ,  $B$ ,  $S_s$  и  $\phi$  и экспериментально определяемых величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  приводятся в работах (Копылова,

Болдина, 2006; Igarashi, Wakita, 2001; Matsumoto, Roeloffs, 2003; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, Agnew, 1989):

$$\beta = [(1 - E_b)/E_b][3/(2\rho g A_s(1 + \nu)) - \beta_u], \quad (2)$$

где  $\beta_u$  – сжимаемость твердой фазы скелета водовмещающей породы,  $\nu$  – коэффициент Пуассона для условий оттока воды (дренированные условия),  $\rho$  – плотность порового флюида,  $g$  – ускорение свободного падения;

$$V = (\rho g A_s \beta) / [1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)]; \quad (3)$$

$$S_s = \rho g (\beta + \phi \beta_f), \quad (4)$$

где  $\beta_f$  – сжимаемость порового флюида;

$$\phi = [(\beta - \beta_u)(1 - V)] / [V(\beta_f - \beta_u)]. \quad (5)$$

При построении графиков (рис. 4-7) использовалась табличная величина сжимаемости порового флюида  $\beta_f = 4.4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$  (холодная пресная вода без газа с плотностью  $\rho = 1.0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) и величина ускорения силы тяжести  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ . Величина коэффициента Пуассона для условий оттока воды (дренированные условия) принималась равной  $\nu = 0.25$ ; сжимаемость твердой фазы скелета породы принималась равной сжимаемости кварца  $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$  (Roeloffs, 1998).

На рис. 4 показано, что сжимаемость скелета породы уменьшается при росте величин  $A_s$  и  $E_b$ . С учетом диапазонов изменения величин  $E_b$  и  $A_s$  для реальных скважин (табл. 2), наиболее характерные значения  $\beta$  составляют  $7 \cdot 10^{-12} - 2 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ .

Величина коэффициента Скемптона может изменяться от 0.22 до 0.9 и закономерно уменьшается с увеличением  $E_b$  и незначительно увеличивается с ростом  $A_s$  (рис. 5). В большей степени величина  $V$  связана с величиной барометрической эффективности  $E_b$ .

Величина удельной упругой емкости плавно уменьшается с увеличением  $E_b$  и  $A_s$  (рис. 6). Вместе с тем, при оценке величины  $S_s$  необходимо учитывать следующие очевидные ограничения.  $S_s$  может изменяться от  $1.5 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-4} \text{ м}^{-1}$  при  $A_s = 0.01 \text{ м/10}^{-7}$  и  $E_b = 0.12 - 0.80 \text{ см/гПа}$ ;

$$S_s = 3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1} \text{ при } A_s = 0.03 \text{ м/10}^{-7}$$

$$\text{и } E_b = 0.12 - 0.80 \text{ см/гПа};$$

$$S_s = 3.5 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ при } A_s = 0.08 \text{ м/10}^{-7}$$

$$\text{и } E_b = 0.12 - 0.80 \text{ см/гПа};$$

$$S_s = 5.5 \cdot 10^{-8} - 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ при } A_s = 0.1 \text{ м/10}^{-7}$$

$$\text{и } E_b = 0.12 - 0.79 \text{ см/гПа};$$

$$S_s = 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ при } A_s = 0.13 \text{ м/10}^{-7}$$

$$\text{и } E_b = 0.12 - 0.73 \text{ см/гПа};$$

$$S_s = 1.5 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1} \text{ при } A_s = 0.18 \text{ м/10}^{-7}$$

$$\text{и } E_b = 0.12 - 0.66 \text{ см/гПа}.$$

Величина пористости  $\phi$  по (5) и с учетом (2)-(4) определяется, в основном, величиной приливной чувствительности уровня воды  $A_s$ . С ростом  $A_s$  она уменьшается (рис. 7). При увеличении барометрической эффективности  $E_b$  величина  $\phi$  весьма слабо уменьшается.

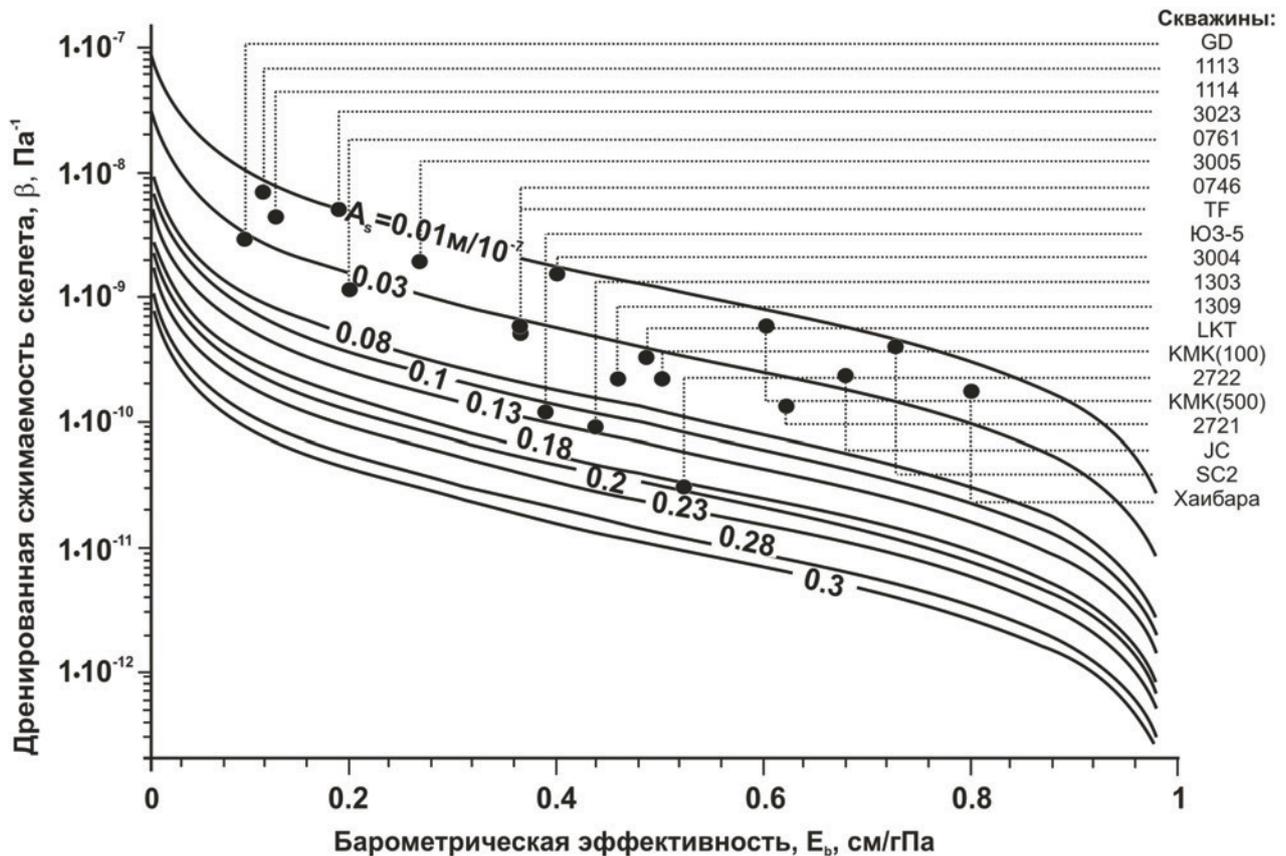


Рис. 4. Связь сжимаемости скелета водовмещающей породы  $\beta$  по формуле (1) и величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  для статически изолированных условий в системе «скважина – водовмещающая порода».

Таблица 2. Характеристика скважин, барометрического и приливного откликов уровня воды.

Скважина	Регион	Координаты, градусы		Глубина, м; открытый интервал, м; середина интервала, м	Возраст и состав водовмещающих пород	Барометрическая эффективность, $E_p$ , см/гПа	Приливая чувствительность уровня воды по отношению к площадной деформации $A_s^*$ , $m/10^{-7}$	Литературный источник
		с.ш.	в.д.					
1303	Камчатка	53.08	158.21	800; 517-717; <b>617</b>	$N_2-N_1^2$ туфопесчаники, туфобрекчии, туфоалевролиты, андезиты	0.43	0.108 ( $M_2$ ) 0.169 ( $O_1$ ) <b>0.143</b>	(Копылова и др., 2007)
1309		56.05	158.95	750; 223-750; <b>527</b>	$N_{a1}$ туфы	0.45	0.127 ( $M_2$ ) 0.060 ( $O_1$ ) <b>0.066</b>	(Копылова и др., 2007)
Ю3-5		53.17	158.41	800; 310-800; <b>555</b>	$K_2$ алевролиты, сланцы	0.39	0.090 ( $M_2$ ) 0.150 ( $O_1$ ) <b>0.105</b>	(Копылова и др., 2007)
1113	Хабаровский край	52.77	140.15	50; 22-26, 31-44; <b>24, 38</b>	PZ-KZ, литокристал-лические туфы, тектонический меланж	0.12	0.016 ( $M_2$ ) 0.011 ( $O_1$ ) <b>0.011</b>	(Копылова и др., 2007)
1114		48.53	135.22	72; 44-53, 60-64; <b>48, 62</b>	$K_1$ сланцы, песчаники	0.13	0.011 ( $M_2$ ) 0.013 ( $O_1$ ) <b>0.012</b>	(Копылова и др., 2007)
2721	Курилы	45.23	147.88	857; 712-818; 765	$N_2$ туфоалевролиты, туфопесчаники	0.62	0.042 ( $M_2$ ) 0.069 ( $O_1$ ) <b>0.048</b>	(Копылова и др., 2007)
0746	Привайкалье	51.53	107.05	504; 340-350, 360-380, 445-455; <b>345,</b> <b>370,</b> <b>450</b>	$K_1$ песчаники, алевролиты	0.37	0.042 ( $M_2$ ) 0.047 ( $O_1$ ) <b>0.040</b>	(Копылова и др., 2007)
0761		56.02	110.92	250; 222-232; <b>227</b>	PR-MZ граниты трещиноватые	0.20	0.044 ( $M_2$ ) 0.042 ( $O_1$ ) <b>0.043</b>	(Копылова и др., 2007)

Таблица 2. Окончание

3004	Северный Кавказ	44.43	41.77	310; 130-134, 169-178, 187-192; <b>132,</b> <b>174,</b> <b>190</b>	$N_1$ глина с прослоями песчаников, мергелей, песков	0.40	0.020 ( $M_2$ ) 0.021 ( $O_1$ ) <b>0.015</b>	(Копылова и др., 2007)
3005		44.08	42.92	270; 126-186; <b>156</b>	$P_1$ аргиллиты, песчаники	0.26	0.026 ( $M_2$ ) 0.051 ( $O_1$ ) <b>0.023</b>	(Копылова и др., 2007)
3023		44.03	44.47	320, 202-298; <b>250</b>	$Q_1-N_2$ пески, песчаники, глины	0.18	0.009 ( $M_2$ ) 0.008 ( $O_1$ ) <b>0.010</b>	(Копылова и др., 2007)
GD				18-88; <b>53</b>	гранодиориты	0.37	0.030 ( $M_2$ ) 0.024 ( $O_1$ )	(Rojstaczer, Agnew, 1989)
TF				152-177; <b>164</b>	морские отложения	0.37	0.034 ( $M_2$ ) 0.029 ( $O_1$ )	(Rojstaczer, 1988a, 1988b)
JC				147-153; <b>155</b>	песчаники, алевролиты	0.67	0.028 ( $M_2$ ) 0.022 ( $O_1$ )	(Rojstaczer, 1988a; Rojstaczer, Agnew, 1989)
SC2				66-70; <b>68</b>	трещиноватые базальты	0.78	0.013 ( $M_2$ ) 0.007 ( $O_1$ )	(Rojstaczer, 1988a; Rojstaczer, Agnew, 1989)
LKT				152-296 <b>224</b>	риолиты	0.41	0.034 ( $M_2$ ) 0.031 ( $O_1$ )	(Rojstaczer, 1988b; Rojstaczer, Agnew, 1989)
MM мелкая				308; 82-84; <b>83</b>	граниты трещиноватые	-	0.022 ( $M_2$ ) 0.016 ( $O_1$ )	(Roeloffs et al., 1989)
MM глубокая		35.55	120.29	308; 235-247; <b>241</b>	граниты трещиноватые	-	0.053-0.110 ( $M_2$ ) 0.022-0.069 ( $O_1$ )	
Хаибара (Haibara)		34.79	138.19	170; 71-154; <b>112</b>	песчаники, аргиллиты	0.80	0.012 ( $M_2$ )	(Matsumoto, Roeloffs, 2003)
КМК 100				110; 99-110 <b>104</b>	аргиллиты	0.50	0.074 ( $M_2$ ) 0.059 ( $O_1$ ) <b>0.074</b>	(Igarashi, Wakita, 1991)
КМК 500		35.3	139.5	500; 484-495 <b>490</b>	песчаники	0.60	0.265 ( $M_2$ ) 0.224 ( $O_1$ ) <b>0.267</b>	

Примечание: \* – приводятся оценки приливной чувствительности уровня воды по наиболее мощным приливным волнам полусуточной группы ( $M_2$ ) и суточной группы ( $O_1$ ); полужирным шрифтом показаны средние величины по всем выделенным волнам.

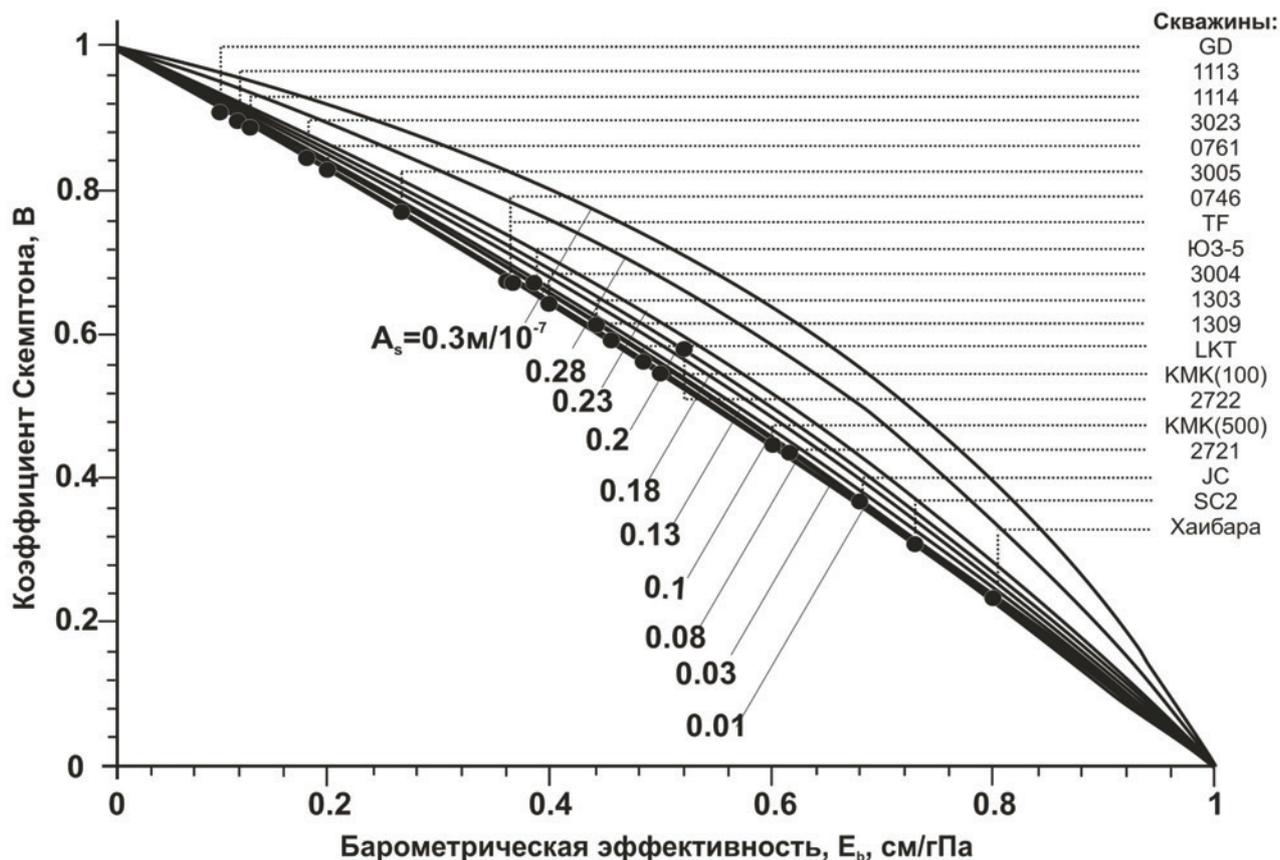


Рис. 5. Связь коэффициента Скемптона  $B$  по формуле (2) и величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  для статически изолированных условий в системе «скважина – водовмещающая порода».

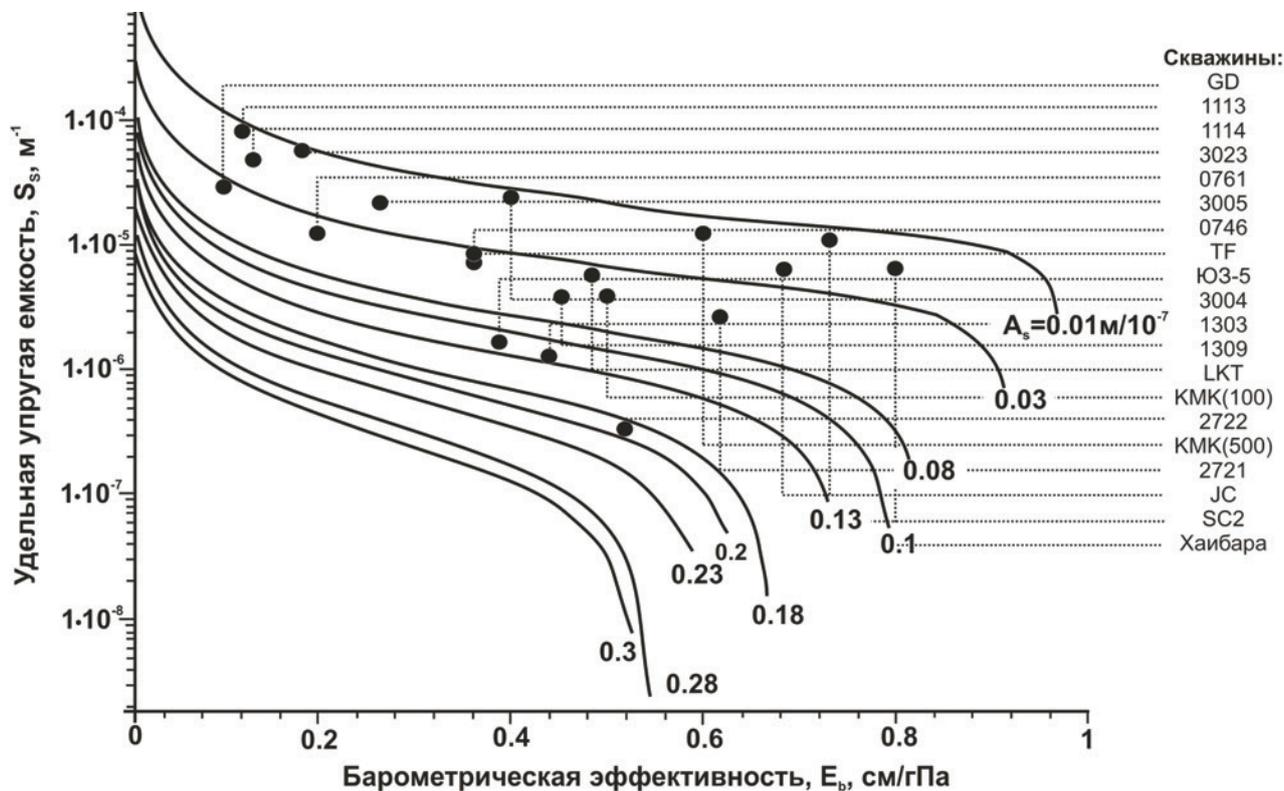
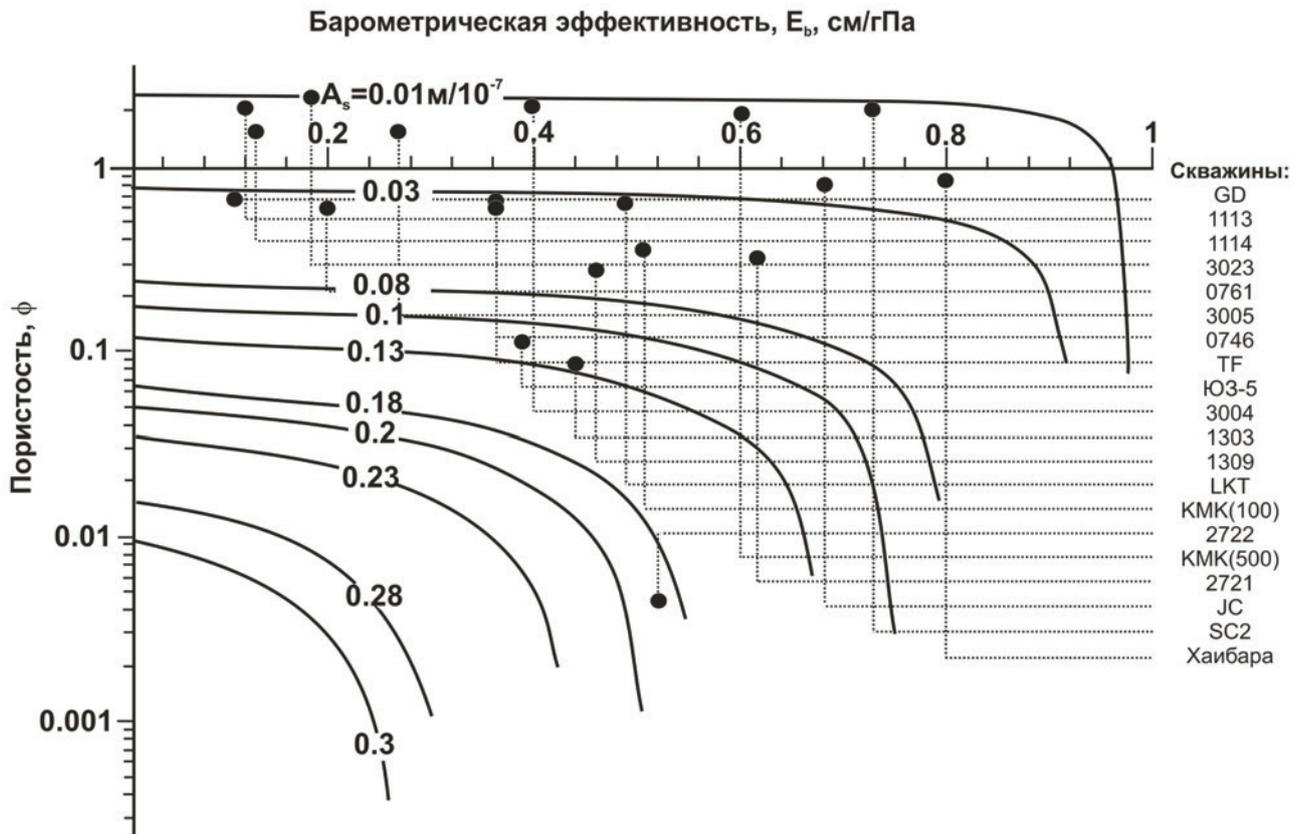


Рис. 6. Связь удельной упругой емкости  $S_s$  по формуле (3) и величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  для статически изолированных условий в системе «скважина – водовмещающая порода».



**Рис. 7.** Связь пористости водовмещающих пород  $\phi$  по формуле (4) и величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды  $A_s$  для статически изолированных условий в системе «скважина – водовмещающая порода».

При оценке  $\phi$  также необходимо учитывать следующие ограничения. Величина  $\phi$  не может оцениваться при низкой величине приливной чувствительности уровня воды ( $A_s \approx 0.01 \text{ м/10}^{-7}$ ). Если  $A_s = 0.03 \text{ м/10}^{-7}$ , то при  $E_b = 0.12\text{-}0.80 \text{ см/гПа}$  величина  $\phi$  может принимать значения в диапазоне от 45 до 70%. При  $A_s = 0.08 \text{ м/10}^{-7}$  и  $E_b = 0.12\text{-}0.80 \text{ см/гПа}$  величина  $\phi$  может составлять 1.5-22%. При  $A_s = 0.10 \text{ м/10}^{-7}$  и  $E_b = 0.12\text{-}0.75 \text{ см/гПа}$  величина  $\phi$  может изменяться от 1 до 15%. При  $A_s = 0.13 \text{ м/10}^{-7}$  и  $E_b = 0.12\text{-}0.65 \text{ см/гПа}$  диапазон значений пористости сокращается ( $\phi = 1\text{-}10\%$ ). Если  $A_s = 0.18 \text{ м/10}^{-7}$  и  $E_b = 0.12\text{-}0.52 \text{ см/гПа}$ , то водовмещающая порода характеризуется малыми величинами пористости ( $\phi = 1\text{-}6\%$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение величин  $E_b$  и  $A_s$  по данным синхронной регистрации уровня воды и атмосферного давления в пьезометрической скважине при установленных статически изолированных условиях позволяет оценивать по формулам (1)-(4) упругие параметры и пористость вскрытых скважиной водовмещающих пород. При этом наиболее надежные оценки можно получить для величин сжимаемости скелета породы и коэффициента Скемптона.

Оценки удельной упругой емкости и пористости водовмещающей породы менее надежны. Для этих параметров по данным о  $E_b$  и  $A_s$  можно лишь определять возможные диапазоны величин.

### Список литературы

- Болдина С. В., Копылова Г. Н.* Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 112-119.
- Копылова Г. Н.* Изменения уровня воды в скважине Ю3-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
- Копылова Г. Н.* Оценка информативности равномерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56-68.
- Копылова Г. Н., Болдина С. В.* Оценка порупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине Ю3-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17-28.
- Копылова Г. Н., Куликов Г. В., Тимофеев В. М.* Оценка состояния и перспективы развития

- гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75-83.
- Любушин А.А.* Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103-108.
- Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J.* Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. № 10. P. 1824-1832.
- Igarashi G., Wakita H.* Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // JGR. 1991. V. 96. №. B3. P. 4269-4278.
- Matsumoto N., Roeloffs E.A.* Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan: II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties // Geophysical Journal International. 2003. V. 155. P. 899-913.
- Roeloffs E. A.* Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // JGR.1998. V. 103. № B1. P. 869-889.
- 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 // JGR. 1989. V. 94. № B9. P. 12387-12402.
- Rojstaczer S.* Determination of fluid flows properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading // Water Resour. Res. 1988a. V. 24. № 11. P. 1927-1938.
- Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // JGR.1988b. V. 93. № B11. 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 // JGR. 1989. V. 94. № B9. P. 12403-12411.
- Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719-8721.

## POSSIBILITY TO ESTIMATE THE ELASTIC PARAMETERS OF WATER-SATURATED ROCKS ACCORDING TO WATER-LEVEL OBSERVATIONS IN PIEZOMETRIC WELLS

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

*Kamchatka Branch of Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences*

The paper presents processing methods of data from level observations in the wells to estimate the elastic parameters of the water-bearing rocks using the values of barometric efficiency and water level tidal sensitivity. The application of this method is stipulated by presence of static-confined response of water level in the well within time hourly periods. Such a water level response can appear at periods from hours to the first tens of days in wells, which penetrate confined groundwater without gas in relatively weak conductive water-bearing rocks at depths of a few hundred meters or deeper. For such wells we can obtain the values of rock matrix compressibility and Scampton's coefficient using the formulas of poroelasticity theory. In this case, the estimations of porosity and specific storage of water-bearing rocks will be approximate.

*Keywords: well, water level, barometric efficiency, tidal sensitivity, compressibility.*