

## МЕХАНИЗМЫ ОТКЛИКА УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Болдина С.В., Копылова Г.Н.*

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, boldina@emsd.ru*

### Введение

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из способов геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов и поиска предвестников землетрясений. Чувствительность уровня воды к изменениям напряженно-деформированного состояния среды определяется процессами деформирования водовмещающих пород и соответствующими вариациями порового давления при подготовке землетрясений, образовании сейсмодислокаций и распространении сейсмических волн. В изменениях уровня воды могут проявляться различные вариации при воздействии сейсмичности на состояние системы скважина-резервуар, соответствующие статическому изменению напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах землетрясений (тип II), динамическому воздействию сейсмических волн (типы III и IV) и процессам подготовки землетрясений (тип I) [2].

Такие особенности в изменениях уровня воды нуждаются в объяснении гидрогеодинамических процессов в системе скважина-резервуар под влиянием землетрясений. Для этого необходимо: 1 - обосновать наличие недренированного статически изолированного отклика уровня воды на вариации порового давления; 2 - оценить упругие и фильтрационные свойства вскрытых водовмещающих пород; 3 - оценить степень инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод; 4 - количественно оценить деформометрические свойства системы скважина-резервуар. В качестве деформометрических свойств системы скважина-резервуар рассматриваются частотный диапазон проявления недренированного статически изолированного отклика уровня воды на вариации порового давления и величина его приливной чувствительности [1, 2, 5].

### Оценка пороупругих параметров водовмещающих пород и инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром по данным уровнемерных наблюдений

По данным синхронных наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления в скважинах ЮЗ-5 (КФ ГС РАН) и 1309 (ОАО «Камчатгеология») (табл. 1) исследован барометрический отклик и выполнена оценка величины барометрической эффективности  $E_b$  в диапазоне часовых-суточных периодов методом кросс-спектрального анализа [2, 3, 4].

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин

Скважина	Координаты, град		Глубина, м Фильтр, м	Уровень, м	Состав пород, возраст	Характеристика флюида	Система регистрации, периодичность
	с. ш.	в. д.					
ЮЗ-5	53.17	158.41	$\frac{800}{310-800}$	1.5	Алевриты, К <sub>2</sub>	холодный пресный	Кедр А2, 10 мин
1309	56.05	158.95	$\frac{250}{223-250}$	4	Туфы, N <sub>2</sub>	холодный пресный	Кедр А2, 10 мин

Для обеих скважин установлены постоянные значения амплитудно-частотных передаточных функций от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в диапазоне периодов от первых часов - первых десятков часов до первых десятков суток при разности фаз 180° [2, 4]. Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в системах скважина-резервуар в соответствующих диапазонах периодов и оценить для этих скважин величины барометрической эффективности  $E_b$ : 0.39±0.13 см/мбар (скважина ЮЗ-5), 0.45±0.25 см/мбар (скважина 1309).

Оценка параметров приливного отклика уровня воды – выделенных амплитуд в изменениях уровня воды, амплитудных факторов (эквивалентных величинам приливной чувствительности  $A_S$ ), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и соответствующей фазой приливного потенциала для отдельных волн производилась по программе

ETERNA 3.0 [14]. Наиболее приемлемыми величинами в качестве характеристик приливных чувствительностей  $A_S$  во всем диапазоне приливных периодов, полученными из регрессионного анализа, являются  $0.096 \pm 0.004$  см/10<sup>-9</sup> для скважины ЮЗ-5 и  $0.066 \pm 0.004$  см/10<sup>-9</sup> для скважины 1309.

На основании гипотезы о статически изолированных условиях в резервуарах, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и 1309, оцененных величин  $E_b$ ,  $A_S$  и по данным откачек рассчитаны упругие и фильтрационные параметры вскрытых водовмещающих пород (табл. 2) [4, 10, 11, 12]. Сравнение полученных величин с аналогичными величинами параметров для резервуаров, сложенных песчаниками [13], указывает на их примерное соответствие.

Таблица 2. Оценка упругих и фильтрационных параметров водовмещающих пород, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и 1309, при сжимаемости твердой матрицы скелета  $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> (кварц)

Скважина	Барометрическая эффективность $E_b$ см/мбар	Приливно-чувствительность $A_S$ м/10 <sup>-7</sup>	Дренирующая 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 $S_S$ м <sup>-1</sup> ·10 <sup>-7</sup>	Пористость $\phi$	Величина водоотдачи, $S$	Коэффициент водопроницаемости по данным откачки $T$ , м <sup>2</sup> /с	Коэффициент фильтрации, $k$ , м/с
ЮЗ-5	0.39	0.096	15.2	0.39	0.67	21.4	0.15	$21.4 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$
1309	0.45	0.066	19.0	0.31	0.60	29.7	0.25	$8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-6}$

Для уточнения параметров инерционности водообмена между скважиной и резервуаром выполнено моделирование реакции уровня воды на периодические изменения порового давления по модели [9] для обеих скважин [1, 4]. Результаты моделирования с учетом геометрических параметров скважин ( $r_c$ ,  $r_w$  – радиусы скважин в областях колебаний уровня воды и связи с резервуаром), а также упругих и фильтрационных параметров водовмещающих пород (табл. 2) показывают, что на периодах приливных и барометрических воздействий (часы-сутки) не происходит искажение амплитудного соотношения и фазового сдвига между изменениями порового давления и вариациями уровня воды в обеих скважинах. Поэтому величина амплитудного соотношения между отдельными компонентами приливных вариаций уровня воды и соответствующими величинами объемной деформации может рассматриваться в качестве нормирующего коэффициента для оценки деформации водовмещающих пород, вскрытых скважинами ЮЗ-5 [5, 10, 11] и 1309 по формуле:

$$D = -\Delta h / A_S, \quad (1)$$

где  $D$  – объемная деформация в нанострейнах; «+» соответствует растяжению, «-» – соответствует сжатию;  $\Delta h$  – изменение уровня воды в см: «+» соответствует повышению уровня воды, «-» соответствует понижению уровня воды.

#### Процессы формирования различных типов вариаций уровня воды в скважине под влиянием землетрясений

В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 обнаружены четыре типа вариаций уровня воды в связи с землетрясениями [2, 5]. В изменениях уровня воды в скважине 1309 выявлено только два типа таких вариаций.

Тип 1 – гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения. Перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г.,  $M=7.8$  наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 продолжительностью около трех недель. Максимальная амплитуда понижения составила 11 см. Из предположения о линейном характере связи между вариациями уровня воды и деформацией водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков ( $10^{-9} - 10^{-7}$ ) [5, 10, 11] можно оценить предсейсмическую деформацию по данным об изменениях уровня воды во всем диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды по формуле (1).

Продолжительность развития гидрогеодинамического предвестника примерно соответствует по периоду верхней границе статически изолированных условий в резервуаре. Эта граница обусловлена особенностями формирования гидростатического напора за счет сезонного

изменения уровня воды в области питания и передачи давления от области питания в район скважины. В этом случае, применение формулы (1) позволяет получить минимальную оценку величины деформации расширения насыщенных верхнемеловых пород на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения ( $1.1 \cdot 10^{-7}$ ) [5].

Тип 2 – косейсмические скачки уровня воды при статическом изменении напряженного состояния водовмещающих пород при образовании сейсмического разрыва. При возникновении местных землетрясений в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 наблюдались скачки во время 10-минутного интервала, в течение которого происходило землетрясение. Амплитуды скачков составляли 12.0-0.25 см. Для всех этих землетрясений по (1) оценены величины косейсмической деформации водовмещающих пород, которые составили  $D=87.4-2.4 \cdot 10^{-9}$ . Характер деформации определялся по направлению изменения уровня воды [5]. Физический механизм формирования косейсмических скачков соответствует отклику порового давления в резервуаре на преимущественно упругую деформацию водовмещающих пород при образовании сейсмического разрыва в очаге землетрясения.

Тип 3 – длительное постсейсмическое понижение уровня воды в скважине после землетрясения. После Кроноцкого землетрясения в скважине ЮЗ-5 происходило понижение уровня воды в течение 3.5 месяцев с амплитудой  $\sim 1$  м [2]. После Олюторского землетрясения 20.04.2006 г.,  $M=7.6$  в скважине 1309 развивалось понижение уровня в течение 4 суток с амплитудой 10 см. Наиболее вероятным процессом, вызвавшим длительное понижение уровня воды, является падение порового давления в окрестностях скважин вследствие локального повышения проницаемости водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях. Результаты моделирования понижения уровня воды в скважинах по зависимости, выведенной из уравнения математической теории диффузии [8]

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}\left(R/\sqrt{4ct}\right), \quad (2)$$

где  $x$  - уровень воды в скважине,  $x_0$  - начальный уровень воды в скважине,  $\Delta h = \Delta p / \rho g$  - изменение напора при изменении порового давления  $\Delta p$ ,  $R$  - радиус чувствительности скважины к локальному источнику падения порового давления,  $c = k / S_s$  - пьезопроводность,  $t$  - длительность понижения уровня, показывают, что такое понижение уровня в скважине ЮЗ-5 могло произойти вследствие падения порового давления в локальном источнике на расстоянии  $R=450$  м при величине пьезопроводности  $c=0.42$  м<sup>2</sup>/с (рис. 1а), а в скважине 1309 при  $c=1.62$  м<sup>2</sup>/с и  $R=190$  м (рис. 1б).

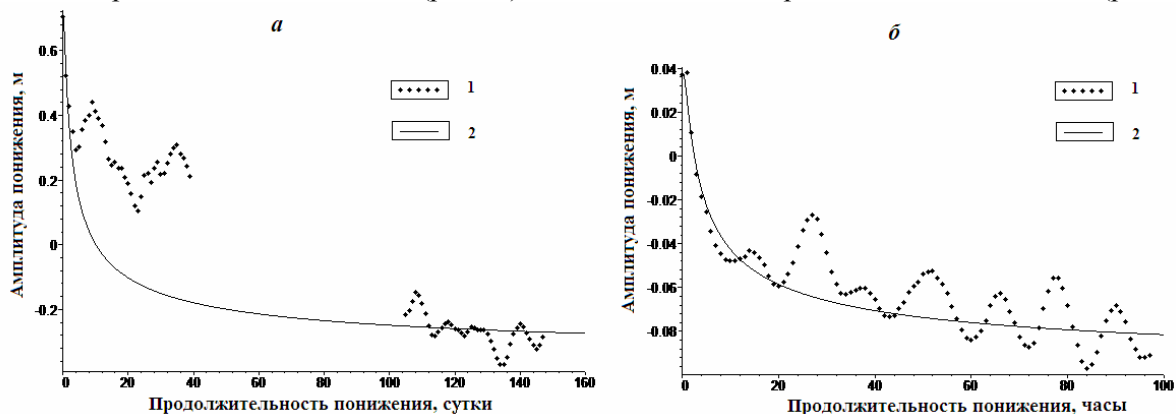


Рис. 1. Результаты моделирования понижения уровня воды в скважинах (а) ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. и (б) 1309 после Олюторского землетрясения 20.04.2006 г.: 1 – экспериментальные данные понижения уровня воды; 2 – теоретическое понижение уровня воды.

Отклонение фактического понижения уровня воды в течение первых десятков суток от расчетной зависимости в скважине ЮЗ-5 (рис 1а), возможно, связано с действием не одного, а нескольких источников разнонаправленного изменения порового давления в относительно удаленных зонах контролируемого резервуара подземных вод.

Тип 4 – колебания уровня воды в скважине вследствие динамического воздействия низкочастотных поверхностных сейсмических волн. В скважине ЮЗ-5 обнаружены колебания

\* Здесь функция  $\operatorname{erfc}(x)$  – дополнение до 1 функции ошибки  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du$ . – Прим.ред.

уровня воды продолжительностью 3-10 ч в связи с тремя землетрясениями: 25.09.2003 г.,  $M=8.3$ ,  $R=1670$  км, о. Хоккайдо; 26.12.2004 г.,  $M=9$ ,  $R=8250$  км и 28.03.2005 г.,  $M=8.7$ ,  $R=8200$  км, о. Суматра [2]. В скважине 1309 обнаружены колебания уровня воды продолжительностью 4-6 ч в связи с землетрясениями 15.11.2006 г.,  $M=8.3$  и 13.01.2007 г.,  $M=8.1$  в районе о. Симушир. Максимальные амплитуды изменений уровня воды наблюдались во время вступления поверхностных волн, затем в течение часов происходили свободные колебания столба воды в скважинах.

Вариации уровня воды при прохождении низкочастотных поверхностных сейсмических волн от удаленных землетрясений могут быть обусловлены изменениями порового давления в резервуаре и вертикальными смещениями поверхности земли. В работе [7] показано, что степень, с которой уровень воды в скважине реагирует на прохождение сейсмических волн, определяется не только характеристиками скважины и вскрытого резервуара, но и в значительной степени зависит от вида и периода сейсмической волны  $\tau$ .

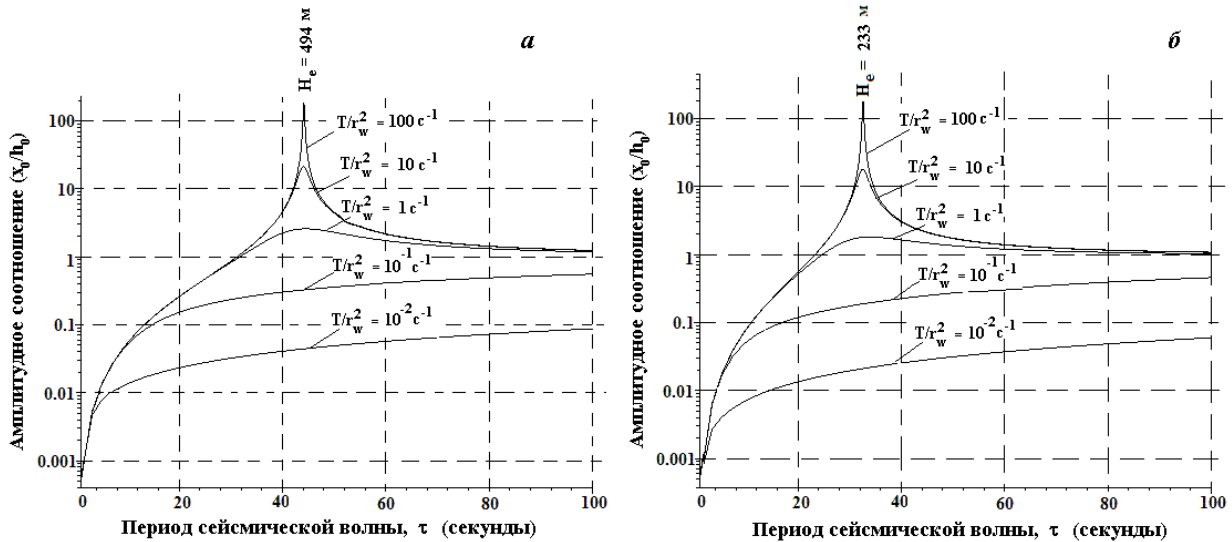


Рис. 2. Изменение амплитудного соотношения  $x_0/h_0$  между вариациями уровня воды в скважинах ЮЗ-5 (а), 1309 (б) и изменением напора в резервуарах в зависимости от параметра  $T/r_w^2$  и периода сейсмической волны  $\tau$ .

Выполнено моделирование затухающих осцилляций уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн с периодами равными или превышающими собственные частоты колебаний скважин  $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$ , где  $H_e$  - эффективная высота столба воды в скважине, с учетом резонансного усиления вариаций порового давления в системе скважина-резервуар [5, 7]:

$$A = x_0/h_0 = \left[ \left( 1 - \frac{\pi r_w^2}{T\tau} Kei\alpha_w - \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} \right)^2 + \left( \frac{\pi r_w^2}{T\tau} Ker\alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$  - безразмерная функция частоты, выраженная через параметры водовмещающих пород и геометрические параметры скважины. Результаты моделирования показывают, что такие изменения уровня воды могут возникать в обеих скважинах при прохождении сейсмических волн с периодами  $\tau=44,6$  с (скважина ЮЗ-5) и  $\tau=33$  с (скважина 1309) при величинах  $T/r_w^2$  не менее  $1 \text{ c}^{-1}$  (рис. 2а, б). Такая величина  $T/r_w^2$  превышает на два порядка аналогичные величины, полученные по приливному и барометрическому откликам уровня воды и по данным откачек из скважин (для скважины ЮЗ-5  $T/r_w^2 \leq 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$  [5] и для скважины 1309  $T/r_w^2 \leq 1.8 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ ). Для объяснения этого эффекта привлекаются данные физического эксперимента [6], показывающие рост проницаемости водонасыщенных образцов горных пород при прохождении упругих сейсмических волн. В качестве механизма увеличения проницаемости рассматривается образование микрогидроразрывов в насыщенных породах при задержке понижения порового давления по отношению к понижению общего давления. В этом случае эффективное напряжение в скелете породы резко возрастает и может превысить предел его прочности.

## Обсуждение и выводы

На основе экспериментальных данных наблюдений и оцененных свойств водовмещающих пород, вскрытых скважинами ЮЗ-5 и 1309, построены теоретические зависимости изменения уровня воды при гармонических вариациях порового давления в широком диапазоне периодов с учетом эффектов водообмена между скважинами и резервуарами подземных вод. На периодах, соответствующих диапазону действия барометрических, приливных и медленных сейсмотектонических вариаций напряженно-деформированного состояния среды, искажение отклика уровня воды на изменения порового давления в этих скважинах не ожидается. Это позволяет использовать оцененные величины приливной чувствительности  $A_S$  для обеих скважин в качестве нормирующих коэффициентов для оценки сейсмотектонической деформации водовмещающих пород в диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды.

Проанализированы особенности гидрогеодинамических процессов при развитии четырех типов вариаций уровня воды в скважинах, вызванных различными механизмами сейсмического воздействия на состояние системы скважина-резервуар:

- бухтообразное понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение трех недель обусловлено падением порового давления при развитии квазиупругой деформации расширения водовмещающих пород на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения;

- косейсмические скачки во время местных землетрясений фиксируют повышение или понижение порового давления вследствие упругой деформации водовмещающих пород при образовании сейсмических разрывов в очагах землетрясений;

- длительные понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения и в скважине 1309 после Олюторского землетрясения обусловлены падением порового давления в толще водовмещающих пород в радиусах чувствительности скважин вследствие локального повышения проницаемости пород при вибровоздействии сейсмических волн;

- низкочастотные поверхностные сейсмические волны от сильных удаленных землетрясений вызывают вынужденные и свободные колебания уровня воды в скважинах за счет кратковременного повышения проницаемости водовмещающих пород, увеличения их водопроницаемости и усиления вариаций порового давления в системе скважина-резервуар.

## Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 112-119.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
3. Копылова Г.Н., Любушин А.А., Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканонология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69-79.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканонология и сейсмология. 2006. № 2. С. 52-64.
5. Копылова Г.Н. Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина-резервуар (на примере скважины ЮЗ-5) // Геофизический мониторинг Камчатки. Матер. научно-технической конференции КФ ГС РАН. Петропавловск-Камчатский: Отгиск, 2006. С. 122-130.
6. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Влияние сейсмической вибрации на проницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов / Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. С. 155-161.
7. 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.
8. Crank J. The Mathematics of Diffusion. Oxford Sci., Oxford, U.K., 1975. 421 p.
9. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.
10. 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.
11. Roeloffs E. A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 869-889.
12. 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.
13. 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.
14. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BИM. 1994. № 118. P. 8719-8721.