

**ОТКЛИК УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА,  
НА СУМАТРА-АНДАМАНСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ  
26 ДЕКАБРЯ 2004 г.,  $M = 9.3$**

© 2007 г. Г. Н. Копылова, С. В. Болдина

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 25.12.2006 г.

В скважине ЮЗ-5, Камчатка, зарегистрированы вынужденные и свободные колебания уровня воды при прохождении сейсмических волн от Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 г.,  $M_w = 9.3$ , гипоцентральное расстояние 8250 км. Максимальная амплитуда колебаний уровня воды наблюдалась во время вступления поверхностных сейсмических волн с характерным периодом 20–50 с и составляла не менее 5 см. Общая продолжительность вынужденных и свободных колебаний уровня воды составила около десяти часов. По имеющимся теоретическим моделям, описывающим колебательный режим вариаций уровня воды в скважине при воздействии сейсмических волн и при экспресс-наливах, выполнена оценка водопроницаемости резервуара подземных вод. Полученные величины превышают величину водопроницаемости по данным откачки не менее чем на два порядка. Предложена гипотеза, объясняющая временное повышение водопроницаемости резервуара при прохождении сейсмических волн за счет нарушения структуры трещинно-порового пространства и резкого увеличения проницаемости водовмещающих пород.

**ВВЕДЕНИЕ**

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах включают синхронную регистрацию вариаций уровня воды и атмосферного давления и традиционно рассматриваются в качестве эффективного способа контроля напряженно-деформированного состояния верхних горизонтов земной коры. Например, отклик уровней воды на земные приливы показывает, что уровнемерные наблюдения могут быть использованы для обнаружения небольших деформаций в коре порядка  $10^{-8}$ – $10^{-9}$ . Особый интерес к такому виду геофизических наблюдений вызван тем, что в изменениях уровней воды в скважинах обнаруживаются разнообразные вариации, вызванные процессами подготовки и реализации сильных землетрясений [1, 2]. Это указывает на необходимость углубленного изучения гидрогеодинамических процессов в системе скважина – резервуар под влиянием сейсмичности.

Воздействие сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений может вызывать заметные вариации уровней воды в скважинах [1, 7]. После Аляскинского землетрясения 28.03.1964 г.,  $M_w = 8.8$  колебания уровней воды в скважинах наблюдались на расстояниях до 11 тыс. км от очага. Продолжительность вариаций уровней воды с амплитудами от первых сантиметров до 4.5 м составляла от часов до одних суток [1, 8].

Интересным фактом является то, что в близко расположенных скважинах отклики уровней воды на прохождение сейсмических волн могут су-

щественно различаться по амплитуде. Изучение таких вариаций уровня воды представляет интерес для геофизиков, сейсмологов и гидрогеологов: во-первых, с позиции использования систем скважина – резервуар в качестве своеобразных приемников сейсмических сигналов и, во-вторых, для оценки свойств резервуара, в первую очередь, его водопроницаемости.

В работе приводится описание эффекта прохождения сейсмических волн от Суматра-Андаманского землетрясения 26 декабря 2004 г.  $M_w = 9.3$ , проявившегося в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка. На основе модели перемещения столба жидкости в скважине при развитии нестационарной воронки депрессии порового давления при воздействии сейсмических волн [7] выполнена оценка водопроницаемости резервуара подземных вод, вскрытого скважиной ЮЗ-5. Проводится сопоставление полученной величины с величинами водопроницаемости, оцененными по приливному и барометрическому откликам уровня воды, по данным откачки из скважины и по аналитической зависимости, описывающей колебательный режим уровня воды при мгновенном наливе в скважину.

**Данные наблюдений, параметры резервуара подземных вод и характеристика отклика уровня воды на землетрясение.** Наблюдения на скважине ЮЗ-5 (53.169° с. ш., 158.414° в. д., глубина 800 м) проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня воды и атмосферно-

го давления Кедр А2 (ООО “Полином”, г. Хабаровск). Частота измерений составляет один раз в 10 мин. Точность регистрации уровня воды составляет 0.1 см, атмосферного давления – 0.2 мбар. Уровень воды в скважине расположен на глубине 1 м ниже поверхности земли. Характеристика геолого-гидрогеологических условий и описание конструкции скважины дается в [2, 3].

В интервале глубин 310–800 м ствол скважины не обсажен. Здесь скважина вскрывает гидравлически связанный резервуар напорных подземных вод в поздне меловых отложениях, представленном чередованием слоев алевролитов и филлитовидных сланцев. Радиус скважины в этом интервале  $r_w = 0.084$  м. Радиус обсадной трубы в области колебаний уровня воды  $r_c = 0.123$  м. Зоны водопритоков общей мощностью 100 м приурочены к слоям трещиноватых алевролитов. Гидравлическая связь подземных вод в пределах вскрытой толщи поздне меловых пород обусловлена интенсивным развитием в ней трещиноватости.

В [3] приводится оценка пористости, упругих и фильтрационных свойств вскрытого резервуара подземных вод на основании анализа приливного и барометрического откликов уровня воды. Получены следующие величины:

удельная упругая емкость $S_s, \text{ м}^{-1}$	$18.7 \times 10^{-7}$ ,
дренированная сжимаемость скелета $\beta, \text{ Па}^{-1}$	$13.8 \times 10^{-11}$ ,
пористость, $\phi$	0.12,
водопроницаемость $T/r_w^2, \text{ с}^{-1}$	$2.8 \times 10^{-5} - 2.8 \times 10^{-2}$ .

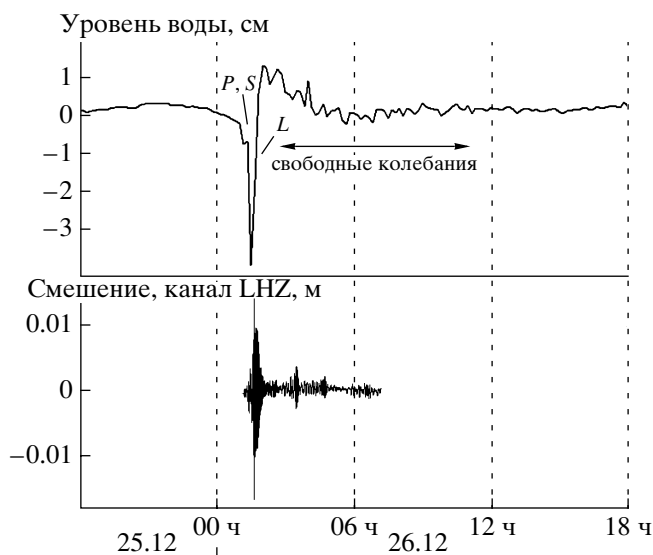
Оценка водопроницаемости резервуара по данным откачки из скважины. По данным откачки из скважины, которая проводилась по окончании бурения, дебит  $Q$  составил  $0.00148 \text{ м}^3/\text{с}$  при понижении уровня воды  $s = 17.55$  м. Оценка величины коэффициента водопроницаемости резервуара  $T = km$ , где  $k$  – коэффициент фильтрации,  $m$  – вскрытая мощность резервуара, проводилась по модели линейного стока для неограниченного резервуара [4, с. 93]:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\lambda m}{r_w}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – эмпирический коэффициент, равный  $\approx 0.7$ ;  $r_w$  – радиус скважины в области связи с резервуаром ( $r_w = 0.084$  м). Величина  $m$  принималась равной суммарной мощности зон водопритоков в трещиноватых алевролитах (100 м).

По (1) величина  $T = 0.9 \times 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ . Отсюда величина  $k = 0.9 \times 10^{-6} \text{ м/с}$ , а величина  $T/r_w^2 = 1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Таким образом, величина  $T/r_w^2$ , полученная по данным откачки, примерно соответствует верхней границе диапазона значений, оцененных по



**Рис. 1.** Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г.,  $M_w = 9.3$ , в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск. Стрелками показаны вступления  $P$ ,  $S$  – волн и  $L$ -волн.

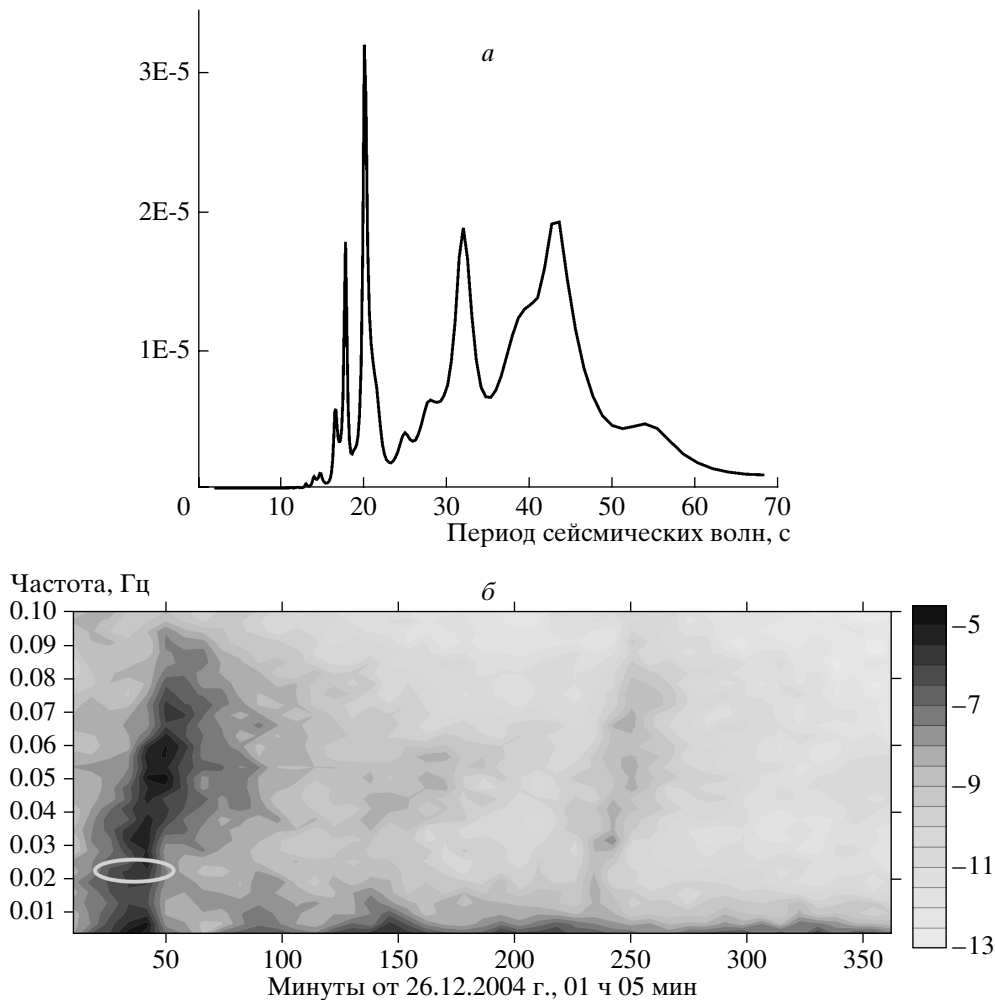
приливному и барометрическому отклику уровня воды в скважине ЮЗ-5.

*Запись Суматра-Андаманского землетрясения на сейсмостанции Петропавловск.* 26 декабря 2004 г. в 0 ч 58 мин в районе о. Суматра, Индонезия, произошло землетрясение с магнитудой  $M_w = 9.3$ , которое вызвало катастрофическое цунами и огромные человеческие жертвы в странах Юго-Восточной Азии. Координаты эпицентра землетрясения  $3.30^\circ$  с. ш. и  $95.78^\circ$  в. д., глубина 10 км, гипоцентральное расстояние  $R$  до скважины ЮЗ-5 составляет 8250 км. Это землетрясение было зарегистрировано на сейсмостанции Петропавловск ( $53.024^\circ$  с. ш.,  $158.653^\circ$  в. д.), расположенной на расстоянии  $\sim 20$  км от скважины ЮЗ-5. В работе использована запись этого землетрясения на канале LHZ (<http://www.iris.washington.edu/>).

Сейсмические волны на сейсмостанции Петропавловск регистрировались более 50 мин: с 01 ч 10 мин до примерно двух часов. Амплитуда вертикального смещения достигала 2 см (рис. 1).

В спектре мощности смещений по каналу LHZ выделяются максимумы на периодах 17 с, 20 с, 32 с и примерно 45 с (рис. 2а). На рис. 2б представлен динамический спектр мощности смещений по каналу LHZ.

*Эффект прохождения сейсмических волн в изменениях уровня воды.* Прохождение сейсмических волн от этого землетрясения вызвало заметные колебания уровня воды в скважине ЮЗ-5. В таблице приводятся данные 10-минутной регистрации уровня воды и атмосферного давления за период времени с 25 декабря 18 ч 00 мин по 26 де-



**Рис. 2.** Спектральный анализ записи смещений на канале LHZ во время Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г., сейсмостанция Петропавловск: *a* – спектр мощности по методу максимальной энтропии Бурга (длина записи – 60 мин после вступления *P*-волн); *b* – динамический спектр мощности, построенный в окне 10 мин с шагом 2 мин. Длина записи составляет 365 мин и включает 5 мин до вступления *P*-волн и 360 мин после вступления *P*-волн. Эллипсом выделен частотный диапазон, соответствующий периодам поверхностных сейсмических волн 40–50 с.

кабря 18 ч 00 мин. На рис. 1 представлен график изменений уровня воды в сопоставлении с записью смещений поверхности земли на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск. Предварительная обработка записи уровня воды включала компенсацию барометрических вариаций и выделение колебаний в диапазоне периодов 20 мин – 5 с с использованием фильтра высоких частот.

Вступление *P*-волн (01 ч 10 мин 09 с) и *S*-волн (01 ч 20 мин 49 с) сопровождалось колебаниями уровня воды с амплитудой не менее 0.5 см. Вступление *L*-волн (01 ч 32 мин 57 с) сопровождалось изменениями уровня воды с амплитудой не менее 5 см. Затем, в течение примерно девяти часов, наблюдались затухающие свободные колебания уровня воды с амплитудами 0.5–0.2 см. Отношение максимальной амплитуды изменения уровня воды в скважине к максимальному смещению по-

верхности земли во время прохождения *L*-волн составляет не менее 2.5. Интервал наблюдений 10 мин не позволяет более точно оценить максимальную амплитуду изменения уровня воды и коэффициент усиления вариаций уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли.

В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 аналогичные эффекты от прохождения поверхностных сейсмических волн наблюдались еще дважды: в связи с землетрясением 25 сентября 2003 г. в районе о. Хоккайдо,  $M_w = 8.3$ ,  $R = 1670$  км и в связи с афтершоком Суматра-Андаманского землетрясения 28 марта 2005 г.,  $M_w = 8.7$ ,  $R = 8200$  км. В результате землетрясения 25.09.2003 г. максимальная амплитуда изменения уровня воды составила около 2 см, при землетрясении 28.03.2005 г. – 1.2 см. В обоих случаях максимальные амплитуды

Данные регистрации уровня воды и атмосферного давления на скважине ЮЗ-5 с 25.12.2004 г. 18 ч 00 мин по 26.12.2004 г. 18 ч 00 мин, УТ

Дата	Время чч:мм	Уровень воды, см	Атмосферное давление, гПа	Дата	Время чч:мм	Уровень воды, см	Атмосферное давление, гПа
25 декабря 2004 г.	18:00	262.87	999.3	26 декабря 2004 г.	1:10	262.74	1004.8
	18:10	262.96	999.6		1:20	262.30	1004.8
	18:20	263.04	999.6		1:30	262.45	1004.8
	18:30	263.06	999.9		1:40	259.51	1004.8
	18:40	263.13	1000.1		1:50	261.70	1004.8
	18:50	263.17	1000.4		2:00	263.89	1005.0
	19:00	263.21	1000.7		2:10	264.68	1005.0
	19:10	263.25	1000.7		2:20	264.70	1005.0
	19:20	263.25	1001.0		2:30	264.38	1005.3
	19:30	263.36	1001.0		2:40	264.64	1005.3
	19:40	263.42	1001.0		2:50	264.96	1005.3
	19:50	263.45	1001.2		3:00	264.93	1005.3
	20:00	263.47	1001.2		3:10	264.59	1005.3
	20:10	263.49	1001.5		3:20	264.59	1005.6
	20:20	263.42	1001.8		3:30	264.55	1005.6
	20:30	263.42	1001.8		3:40	264.87	1005.6
	20:40	263.42	1002.0		3:50	264.91	1005.6
	20:50	263.45	1002.0		4:00	264.61	1005.8
	21:00	263.42	1002.3		4:10	265.27	1005.8
	21:10	263.36	1002.6		4:20	264.64	1006.1
	21:20	263.30	1002.9		4:30	264.47	1006.1
	21:30	263.25	1002.9		4:40	264.53	1006.4
	21:40	263.25	1002.9		4:50	264.7	1006.7
	21:50	263.19	1003.1		5:00	264.38	1006.7
	22:00	263.17	1003.1		5:10	264.53	1006.7
	22:10	263.06	1003.4		5:20	264.49	1006.9
	22:20	263.02	1003.4		5:30	264.49	1007.2
	22:30	262.96	1003.7		5:40	264.13	1007.2
	22:40	262.94	1003.7		5:50	263.98	1007.2
	22:50	262.83	1003.9		6:00	264.17	1007.5
23:00	262.79	1004.2	6:10	264.08	1007.5		
23:10	262.77	1004.2	6:20	263.93	1007.7		
23:20	262.72	1004.2	6:30	263.74	1007.7		
23:30	262.70	1004.2	6:40	263.74	1007.7		
23:40	262.70	1004.5	6:50	263.57	1007.7		
23:50	262.66	1004.5	7:00	263.28	1008.0		
26 декабря 2004 г.	00:00	262.6	1004.8	7:10	263.45	1008.0	
	00:10	262.64	1004.5	7:20	263.32	1008.0	
	00:20	262.66	1004.5	7:30	263.02	1008.6	
	00:30	262.68	1004.5	7:40	262.64	1008.6	
	00:40	262.72	1004.5	7:50	262.66	1008.6	
	00:50	262.72	1004.5	8:00	262.38	1008.8	
	1:00	262.72	1004.8	8:10	262.3	1008.8	

Таблица. Окончание

Дата	Время чч:мм	Уровень воды, см	Атмосферное давление, гПа	Дата	Время чч:мм	Уровень воды, см	Атмосферное давление, гПа
26 декабря 2004 г.	8:20	261.91	1008.8	26 декабря 2004 г.	13:00	256.6	1010.7
	8:30	261.89	1008.8		13:10	256.45	1010.7
	8:40	261.60	1009.1		13:20	256.34	1010.7
	8:50	261.26	1009.1		13:30	256.34	1011
	9:00	261.09	1009.4		13:40	256.41	1010.7
	9:10	261.04	1009.4		13:50	256.41	1010.7
	9:20	260.72	1009.4		14:00	256.37	1010.7
	9:30	260.43	1009.6		14:10	256.43	1010.7
	9:40	260.19	1009.4		14:20	256.41	1010.7
	9:50	259.96	1009.4		14:30	256.47	1010.7
	10:00	259.58	1009.6		14:50	256.56	1010.7
	10:10	259.43	1009.6		15:00	256.64	1010.7
	10:20	259.26	1009.6		15:10	256.66	1011.0
	10:30	259.15	1009.6		15:20	256.64	1011.0
	10:40	258.98	1009.6		16:00	257.11	1011.3
	10:50	258.64	1009.9		16:10	257.28	1011.3
	11:00	258.36	1009.9		16:20	257.45	1011.3
	11:10	258.28	1009.9		16:30	257.51	1011.3
	11:20	257.9	1009.9		16:40	257.68	1011.3
	11:30	257.81	1010.2		16:50	257.88	1011.3
11:40	257.6	1010.2	17:00	258.00	1011.3		
11:50	257.45	1010.2	17:10	258.17	1011.3		
12:00	257.24	1010.2	17:20	258.34	1011.3		
12:10	257.19	1010.2	17:30	258.49	1011.5		
12:20	256.96	1010.5	17:40	258.62	1011.5		
12:30	256.81	1010.7	17:50	258.75	1011.5		
12:40	256.68	1010.7	18:00	259.02	1011.5		
12:50	256.66	1010.7					

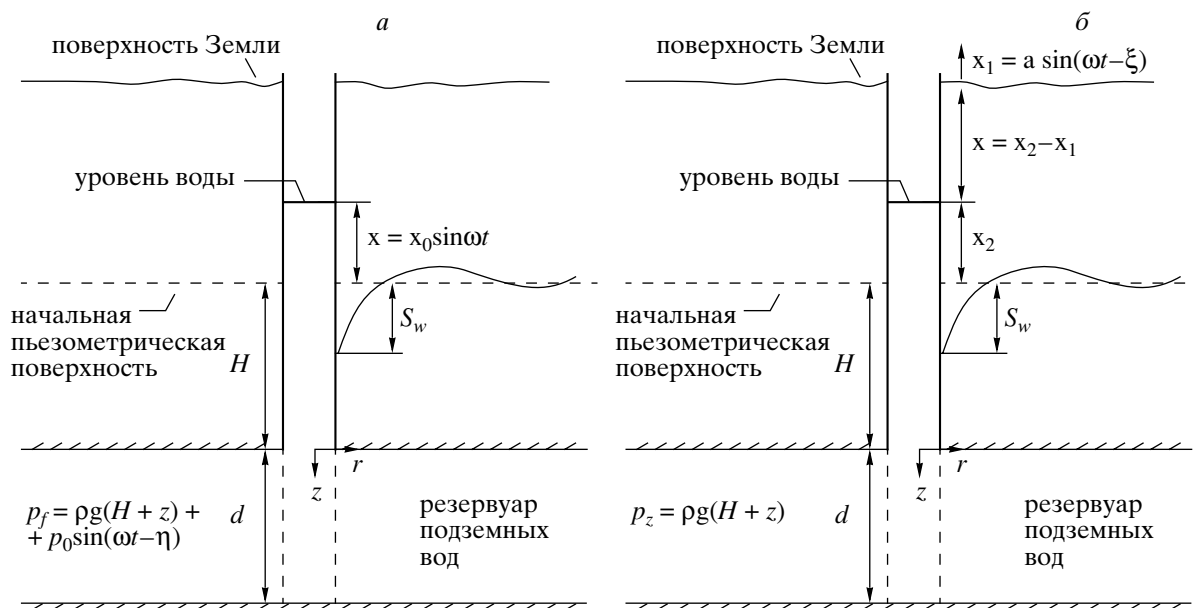
фиксировались во время вступления поверхностных волн, а общая продолжительность колебаний уровня воды составляла около четырех часов.

**Оценка водопроницаемости резервуара.** Модель вариаций уровня воды в скважине при прохождении сейсмических волн [7] выводится из волнового уравнения для затухающих колебаний столба воды в скважине и в прифильтровой зоне резервуара. В [7] показано, что вариации уровня воды в скважине при прохождении сейсмических волн могут быть обусловлены изменениями порового давления в резервуаре и вертикальными смещениями поверхности земли (рис. 3). При этом степень, с которой уровень воды в скважине реагирует на землетрясение, определяется не только характеристиками скважины и вскрытого резервуара, но и в значительной степени зависит от вида и периода сейсмической волны. В случае

Релеевских волн, когда их период равен или больше *резонансной частоты* скважины  $\omega_w$ , изменения уровня воды практически полностью определяются изменениями порового давления в резервуаре  $p_0 = \rho g h_0$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $h_0$  – амплитуда изменения напора, вызванная деформацией водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн.

Резонансная частота  $\omega_w$  зависит, в основном, от эффективной высоты столба воды в скважине  $H_e = H + 3d/8$ , где  $H$  – высота столба воды в обсаженном стволе скважины,  $d$  – высота столба воды в области вскрытого резервуара. Для скважины ЮЗ-5  $H = 310$  м,  $d = 490$  м, а эффективная высота столба воды  $H_e$  составляет 494 м.

Резонансная частота скважины определяется как  $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$ . Отсюда можно оценить периоды сейсмических волн, которые могут вызывать



**Рис. 3.** Схемы формирования отклика уровня воды в скважине *a* – на гармонические вариации порового давления в резервуаре; *б* – на вертикальные смещения системы скважина-резервуар при прохождении сейсмических волн:

$H$  – высота водной колонны в обсаженном стволе скважины;  $d$  – мощность вскрытого резервуара подземных вод (длина открытого интервала ствола скважины);  $z$  – глубина ниже обсадки скважины;  $r$  – горизонтальное расстояние от центра скважины;  $s_w$  – изменение напора в резервуаре;  $x$  – изменение уровня воды при гармонических колебаниях с амплитудой  $x_0$ ;  $\omega$  – угловая частота сейсмической волны;  $t$  – время;  $p_f = \rho g(H + z) + p_0 \sin(\omega t - \eta)$  – выражение для вариаций порового давления в резервуаре при его гармонических изменениях с амплитудой  $p_0$ ;  $p_z$  – гидростатическая компонента порового давления;  $\eta$  – угол сдвига фазы между смещением в сейсмической волне и изменением порового давления;  $x_1$  – гармонические перемещения поверхности земли с амплитудой  $a$ ;  $x_2$  – перемещения водной колонны при вертикальных смещениях поверхности земли;  $\xi$  – угол сдвига фазы между смещением в сейсмической волне и вертикальным перемещением поверхности земли [6].

резонансный эффект усиления гармонических вариаций порового давления в скважине при достаточно высоких величинах водопрониимости:  $\tau \geq 2\pi/\omega_w$ . В случае скважины ЮЗ-5 колебательный режим уровня воды, вызванный резонансным эффектом, может возникать при прохождении волн с периодом порядка 40 с и более. На рис. 2б эллипсом показан частотный диапазон сейсмических волн, способных вызывать резонансное усиление вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 26.12.2004 г.

Усиление вариаций уровня воды в скважине по отношению к изменению напора в резервуаре для резонансных частот выражается по [7] формулой:

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

где  $x_0$  – амплитуда изменения уровня воды,  $h_0$  – амплитуда изменения напора,  $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$  – безразмерная функция частоты, выраженная через параметры резервуара и геометрические парамет-

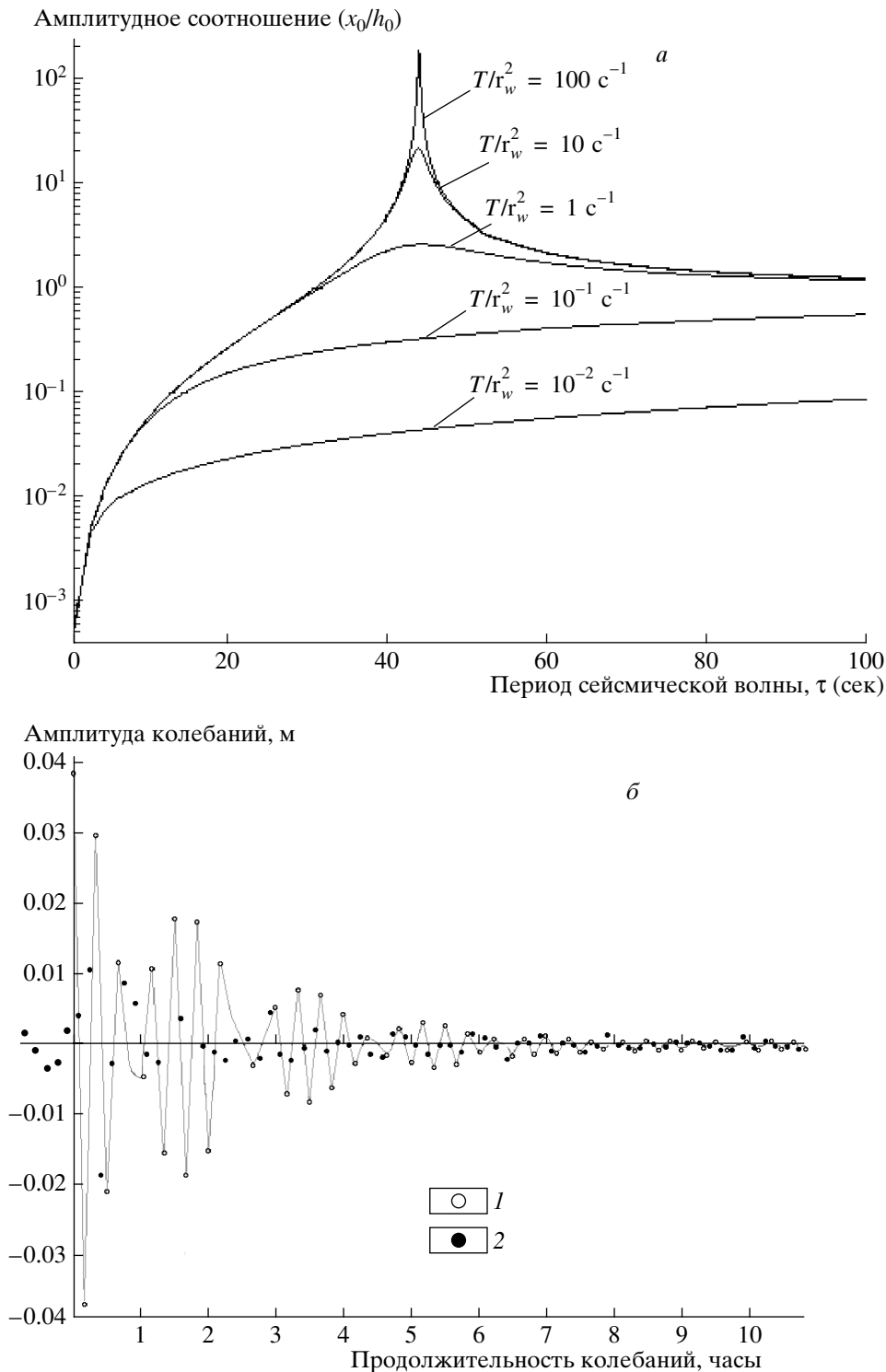
ры скважины:  $r_w$  – радиус скважины в области ее связи с резервуаром,  $S$  – водоотдача или упругая емкость резервуара,  $S = S_e m$ ,  $T$  – коэффициент водопрониимости резервуара,  $\text{Kei} \alpha_w$ ,  $\text{Ker} \alpha_w$  – действительная и мнимая части функции Кельвина нулевого порядка.

Усиление колебаний уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли  $A'$  выражается формулой:

$$A' = x_0/a = \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} A, \quad (3)$$

где  $a$  – амплитуда смещения поверхности земли.

В случае скважины ЮЗ-5 отношение  $A/A'$  на резонансных частотах  $\tau \geq 44.6$  с практически равно единице ( $A/A' \approx 1$ ). Если принять, что  $A' = A \geq 2.5$ , то можно по (2) оценить водопрониимность резервуара подземных вод, вскрытого скважиной ЮЗ-5. Для этого рассчитывалась зависимость усиления вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре  $\tau$ , в зависимости от периода сейсмической волны  $A = x_0/h_0$  (рис. 4а). Принималось, что величина водопрониимности резервуара может изменяться в диапазоне пяти порядков, а



**Рис. 4.** Результаты моделирования колебательного режима уровня воды в скважине ЮЗ-5 для оценки водопроницаемости вскрытого резервуара подземных вод.

*а* – изменение амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скважине и изменением напора в резервуаре  $x_0/h_0$  в зависимости от параметра системы скважина – резервуар  $T/r_w^2$  и периода сейсмической волны  $\tau$ ; *б* – сопоставление 10-минутных вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 и теоретических вариаций уровня воды по (4), (5): 1 – теоретические значения уровня воды при величине начальной амплитуды  $h_0 = 4.2$  см, водопроницаемости  $T = 5 \text{ м}^2/\text{с}$ , водоотдаче  $S = 18.7 \times 10^{-5}$ ; 2 – наблюдаемые значения уровня воды после компенсации баровариаций и высокочастотной фильтрации в часовом временном окне. Ноль временной шкалы соответствует вступлению сейсмических волн 01 ч 10 мин.

величина водоотдачи  $S$  постоянна и составляет  $18.7 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ .

Результаты моделирования показывают, что усиление вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре, вскрытом скважиной ЮЗ-5, могло произойти при величине  $T/r_w^2$  не менее  $1 \text{ с}^{-1}$ . Ранее, на основе анализа приливного и барометрического откликов уровня воды в скважине ЮЗ-5, было получено, что наиболее вероятные значения величины  $T/r_w^2$  составляют не более  $2.8 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  [3]. Оценка водопроницаемости резервуара по данным откачки из скважины также дает сопоставимую величину  $T/r_w^2 = 1 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

В качестве аналогии наблюдаемых вариаций уровня воды при прохождении сейсмических волн (рис. 1) можно рассматривать затухающие колебания уровня воды, возникающие при мгновенном наливе (отборе) воды из скважины. Как правило, высокочастотные осцилляции уровня воды на начальных стадиях восстановления после экспресс-налива возникают в скважинах, вскрывающих высокопроницаемые водовмещающие породы. Такие осцилляции уровня воды также объясняются инерционным эффектом и емкостью скважины [5, 9].

Решение для таких изменений уровня воды в опытной скважине, выведенное из волнового уравнения для затухающих колебаний, имеет вид [9]:

$$h = h_0 \exp(-\omega_w \kappa t) \cos(\omega_w \sqrt{1 - \kappa^2} t), \quad (4)$$

$$\kappa = -\frac{r_c^2}{8T} \omega_w \ln\left(0.79 r_w^2 \frac{S}{T} \omega_w\right), \quad (5)$$

где  $h$  – изменения уровня воды,  $h_0$  – начальное (мгновенное) изменение уровня воды,  $t$  – время.

Сопоставление теоретических изменений уровня воды по (4), (5) с фактическим графиком временного прослеживания вариаций уровня воды в скважине дает возможность оценить величину водопроницаемости резервуара  $T$  при заданных величинах водоотдачи  $S$  (рис. 4б). Оптимальное приближение фактических 10-минутных данных регистрации уровня воды во время Суматра-Андаманского землетрясения к модельным по характеру затухания амплитуды и по продолжительности колебаний уровня воды получено при величине начальной амплитуды  $h_0 = 4.2 \text{ см}$ , водопроницаемости  $T = 5 \text{ м}^2/\text{с}$ , водоотдаче  $S = 18.7 \times 10^{-5}$ . Отсюда следует, что колебательный режим уровня воды в скважине ЮЗ-5 при экспресс-наливом может возникнуть, если величина водопроницаемости  $T/r_w^2$  составляет не менее  $7.1 \times 10^2 \text{ с}^{-1}$ .

Следует отметить существенное различие между механизмами образования колебательно-

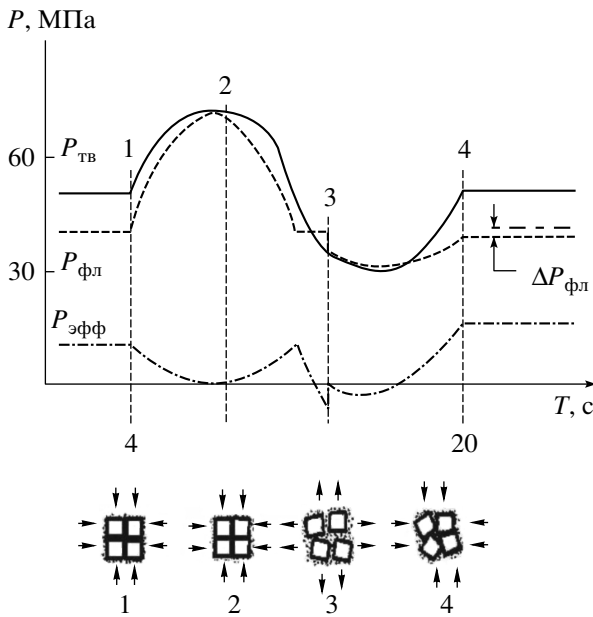
го режима уровня воды при экспресс-опробовании скважин и при прохождении сейсмических волн. В первом случае возбуждение системы скважина-резервуар вызывается поступлением в ствол скважины (или извлечением из нее) некоторого количества воды. При воздействии низкочастотных сейсмических волн колебательный режим уровня воды может вызываться усилением в скважине вариаций порового давления при деформации водовмещающих пород, а также в результате вертикального перемещения поверхности Земли (рис. 3). Вместе с тем, сопоставление величин водопроницаемости, полученных по моделям [7] и [9], с величинами водопроницаемости по данным откачки, показывает, что для объяснения колебательного режима уровня воды в скважине ЮЗ-5 необходимо привлекать гипотезу о значительном улучшении водопроницающих свойств водовмещающих пород вскрытого резервуара.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вынужденные и свободные колебания уровня воды в скважине ЮЗ-5 возникают только при очень сильных и удаленных землетрясениях ( $M = 8.3-9.3$ ,  $R = 1670-8250 \text{ км}$ ), которые генерируют поверхностные волны с периодами не менее десятков секунд и могут вызывать резонансный эффект усиления гармонических колебаний порового давления в системе скважина – резервуар (рис. 3а). Такие колебания уровня воды не регистрируются в скважине ЮЗ-5 в случае возникновения местных землетрясений с величинами магнитуд от менее 5.0 до 7.9. Это объясняется весьма слабой генерацией длиннопериодных поверхностных волн в очагах местных землетрясений на гипоцентральных расстояниях не более первых сотен километров. Регистрация один раз в 10 мин не позволяет точно оценить амплитуду и период колебаний уровня воды во время Суматра-Андаманского землетрясения и аналогичных сейсмических событий. Для этого необходима регистрация уровня воды с периодичностью не менее 1–10 с. Такой недостаток системы регистрации не позволяет на данном этапе построить надежную количественную зависимость возникновения колебательного режима уровня воды в скважине ЮЗ-5 от характера сейсмических волн.

Сопоставление величин водопроницаемости резервуара, полученных по приливному и барометрическому откликам уровня воды и по данным откачки, с величинами водопроницаемости, грубо оцененными по амплитуде изменения уровня воды при прохождении сейсмических волн (рис. 4а) и по теоретическому графику временного прослеживания (рис. 4б), показывает, что они значительно различаются. По модели [7], описывающей колебательный режим уровня воды за счет усиления вариаций порового давления в стволе скважины





**Рис. 5.** Изменение обжимающего ( $P_{ТВ}$ ), порового ( $P_{фл}$ ) и эффективного ( $P_{эфф}$ ) давлений при прохождении сейсмической волны через горную породу [5]: 1 – исходное состояние системы вода-порода; 2 – фаза повышения обжимающего и порового давлений и сжатия образца; 3 – фаза падения давления обжима, разрушение образца под действием порового давления; 4 – фаза сжатия, механическая деформация образца;  $P_{фл}$  – падение порового давления в результате нарушения структуры образца после сейсмической вибрации.

при прохождении низкочастотных поверхностных волн, получена величина водопроницаемости примерно на два порядка больше ( $T/r_w^2 \geq 1 \text{ c}^{-1}$ ).

Такое различие в величинах водопроницаемости резервуара при относительно медленных изменениях порового давления, вызванных приливными, барометрическими воздействиями, а также при откачке (часы – сутки), и при сейсмическом воздействии (секунды – десятки секунд) можно объяснить увеличением проницаемости и улучшением фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений.

На рис. 5 представлены результаты физического моделирования влияния сейсмической вибрации на проницаемость водонасыщенных образцов базальтов, габбро и известняков [6]. В эксперименте регистрировались: обжимающее давление, моделирующее сейсмическую волну ( $P_{ТВ}$ ); поровое давление в образце ( $P_{фл}$ ) и эффективное давление в скелете породы ( $P_{эфф}$ ). Частота осцилляций составляла 0.065 Гц, длительность воздействия – 0.25–22 ч.

Было обнаружено, что при величине давления обжима ниже порового давления ( $P_{ТВ} < P_{фл}$ ) после

сейсмического воздействия проницаемость образцов резко возрастала в 1.2–3.7 раза в результате нарушения его структуры. В фазе понижения давления обжима происходило запаздывание в падении порового давления  $P_{фл}$ . Это вызывало резкий рост эффективного давления  $P_{эфф}$  в скелете породы с превышением его предела прочности (фаза 3 на рис. 5). В результате происходил гидро-разрыв и нарушение исходной структуры образца. Этот механизм качественно объясняет увеличение проницаемости водонасыщенных пород и, соответственно, улучшение фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн.

Вместе с тем, окончательный вывод о значительном улучшении фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении низкочастотных сейсмических волн нуждается в экспериментальной проверке непосредственно на скважине ЮЗ-5. Для этого необходимо в дальнейшем обеспечить регистрацию уровня воды не реже одного измерения в 1–10 с и уточнить водопроницаемость вскрытого резервуара по данным экспресс-наливов в сейсмически спокойное время и после возникновения сильного землетрясения.

## ВЫВОДЫ

1. В скважине ЮЗ-5 зарегистрированы вынужденные и свободные колебания уровня воды в результате воздействия сейсмических волн от Суматра-Андаманского землетрясения 26.12.2004 г.  $M_w = 9.3$ ,  $R = 8250$  км. Максимальная зарегистрированная амплитуда вариаций уровня воды составляла не менее 5 см и наблюдалась во время вступления поверхностных сейсмических волн с характерными периодами 20–50 с. Коэффициент усиления вариаций уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли составил не менее 2.5. Общая продолжительность вынужденных и свободных колебаний уровня воды в результате землетрясения составляла около десяти часов.

2. Теоретические оценки возникновения затухающих осцилляций уровня воды в скважине ЮЗ-5 с периодом  $\tau \approx 40$  с вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в системе скважина-резервуар при воздействии сейсмических волн и при экспресс-наливах (по моделям [7] и [9]) показали, что такие изменения уровня воды могут возникать при величине  $T/r_w^2$  не менее  $1 \text{ c}^{-1}$ . Эта величина превышает на два порядка аналогичную величину, полученную по приливному и барометрическому откликам уровня воды и по данным откачки из скважины ( $T/r_w^2 \leq 1.0\text{--}2.8 \times 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ ).

3. Предложена гипотеза, объясняющая временное улучшение фильтрационных свойств водовмещающих пород при прохождении поверхностных сейсмических волн за счет нарушения структуры трещинно-порового пространства и резкого увеличения проницаемости. Для проверки этой гипотезы необходимо совершенствование системы равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5.

Авторы выражают благодарность за содержательное обсуждение статьи д. г. – м. н. А.В. Кирюхину и сотрудникам КФ ГС РАН Д.В. Дроздину, Н.П. Козыревой и Е.А. Пантюхину за помощь в обработке сейсмической записи землетрясения 26.12.2004 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог предвестников землетрясений. Гидрогеодинамические предвестники. М.: ИФЗ РАН, 1983. 140 с.
2. Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69–79.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
4. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
5. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд. С.-Петербург. ун-та, 2006. 769 с.
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. et al. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915–3926.
8. Sterling A., Smets E. Study of earth tides, earthquakes and terrestrial spectroscopy by analysis of the level fluctuations in Borehole at Haibaart (Belgium) // Geophys. J. Royal Astronom. Soc. 1971. V. 23. № 2. P. 225–242.
9. Van der Kamp G. Determining aquifer transmissivity by means of well response tests: The underdamped case // Water Res. Research. 1976. V. 12. № 1. P. 71–77.

## The Response of Water Level in Well YUZ-5, Kamchatka to the Magnitude 9.3, Sumatra-Andaman Earthquake of December 26, 2004

G. N. Kopylova, S. V. Boldina

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

Forced and free oscillations of water level were recorded in well YuZ-5, Kamchatka due to the passage of seismic waves from the Sumatra-Andaman earthquake of December 26, 2004,  $M_w = 9.3$ , hypocentral distance 8250 km. The greatest amplitude of water level oscillations, at least 5 cm, was observed during the onset of seismic surface waves with a typical period of 20–50 s. The total duration of the forced and free water-level oscillations was about ten hours. The available theoretical models that describe oscillations were used to estimate the transmissivity of the groundwater reservoir. A hypothesis was proposed to explain a temporary increase in reservoir transmissivity during the passage of seismic waves by invoking defective structure of the crack-pore space and a sharp increase in host rock permeability.