

**ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СИСТЕМЕ  
СКВАЖИНА–РЕЗЕРВУАР (НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ ЮЗ-5, КАМЧАТКА)***Г.Н. Копылова<sup>1,2</sup>, С.В. Болдина<sup>2</sup>*<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru<sup>2</sup> Камчатский государственный университет, г. Петропавловск-Камчатский, sboldina@mail.ru**Введение**

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из способов геофизического мониторинга, направленного на поиск предвестников землетрясений. Это связано с высокой чувствительностью вариаций уровня воды к сейсмотектоническим изменениям напряженно-деформированного состояния среды (НДСС), сопровождающихся деформациями водонасыщенных пород, развитием в них трещинной дилатансии, изменениями порового давления [1, 2, 9, 13]. Вместе с тем, выделение сейсмотектонических сигналов из вариаций уровня воды представляет непростую задачу. Объективными причинами этого являются неопределенность частотного диапазона и амплитуд изменений НДСС на стадиях подготовки землетрясений, а также многообразие условий формирования гидрогеодинамического режима конкретных наблюдательных скважин.

Определенные трудности в использовании пьезометрических скважин в качестве своеобразных объемных деформографов вызываются искажающим воздействием на вариации уровня воды течений воды и процессов формирования гидростатического напора. Основными факторами, искажающими отклик уровня воды на изменение порового давления, являются: 1 - инерционность системы скважина-резервуар при течении воды в скважину и из скважины; 2 - процессы водного питания резервуара и формирования гидростатического напора в зависимости от условий в областях питания и разгрузки; 3 - гидравлическая связь контролируемого резервуара и вышележащего грунтового водоносного горизонта со свободной поверхностью.

Наиболее благоприятные условия для обнаружения сейсмотектонической деформации по уровнемерным данным имеются при вскрытии скважинами резервуаров напорных подземных вод, изолированных слабопроницаемыми толщами от влияния вышележащих грунтовых горизонтов. В таких случаях вариации давления в области питания слабо и в сглаженном виде воздействует на величину гидростатического напора в скважине, поэтому может наблюдаться недренированный статически изолированный отклик уровня воды на земные приливы, вариации атмосферного давления и сейсмотектоническую деформацию в широком частотном диапазоне. Условиями эффективного мониторинга НДСС по уровнемерным данным также являются: 1 – применение технических средств синхронной регистрации вариаций уровня воды и атмосферного давления с интервалом дискретизации не менее 10-15 минут; 2 – оценка и компенсация влияния на вариации уровня воды естественных факторов-помех - атмосферного давления, земных и морских приливов, осадков, водного питания и техногенного воздействия; 3 – оценка деформометрических свойств наблюдательных систем скважина-резервуар с определением частотного диапазона проявления неискаженного статически изолированного отклика и величины деформометрической чувствительности вариаций уровня воды [4].

В 1997-2005 гг. на скважине ЮЗ-5 (53.169° с. ш., 158.414° в. д., глубина 800 м, открытый интервал 310-800 м, уровень на глубине 1 м ниже поверхности земли) Камчатским филиалом Геофизической службы РАН проводились наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений [4, 5] с использованием цифровой системы регистрации уровня воды и атмосферного давления Кедр А2 (ООО «Полином», г. Хабаровск). Интервал регистрации составляет 10 минут. Точность регистрации уровня воды составляет 0.1 см, атмосферного давления – 0.2 мбар.

В интервале глубин 310-800 м скважина вскрывает гидравлически связанный резервуар напорных пресных подземных воды в позднемеловых отложениях, представленных чередованием слоев алевролитов и филлитовидных сланцев. Радиус скважины в этом интервале  $r_w=0.084$  м. Зоны водопритоков общей мощностью 100 м приурочены к слоям трещиноватых алевролитов. Гидравлическая связь в пределах вскрытой толщи обусловлена интенсивным развитием трещиноватости в позднемеловых породах [4, 5]. Вскрытый резервуар подземных вод надежно изолирован слабопроницаемой толщей и не имеет гидравлической связи с грунтовым водоносным горизонтом в четвертичных отложениях.

В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 выявлены четыре типа вариаций под влиянием сейсмичности (табл., рис. 1). Они соответствуют различным механизмам сейсмического воздействия на режим подземных вод: статическому изменению напряженного состояния резервуаров напорных подземных вод при образовании разрывов в очагах землетрясений (тип II) [14]; динамическому воздействию сейсмических волн (типы III и IV) и процессам подготовки землетрясений (тип I) [2, 4].

В таблице приводятся данные о землетрясениях, вызвавших соответствующие типы откликов уровня воды. В связи с сильнейшим Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г.,  $M=7.8$ ,  $R=316$  км (№ 1 в табл.) наблюдалось последовательное проявление вариаций уровня воды, соответствующих типу I (гидрогеодинамический предвестник), типу II (косейсмический скачок) и типу III (постсейсмическое понижение уровня воды с последующим восстановлением) [4].

Землетрясения, вызвавшие изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5

Номер землетрясения	Дата, ггммдд	Время в очаге, чч:мм:сс	Координаты, град.		Н, км	$M_w$	Гипо-центральное расстояние R, км	Характеристика вариаций уровня воды			
			с. ш	в. д.				Тип вариаций уровня воды	$\Delta h$ , см	$A_S$ , см/10 <sup>-9</sup>	Деформация по (1) $D^{**}$ , 10 <sup>-9</sup>
1	971205	11:26:51	54.64	162.55	10	7.8	316	I	-11.0	0.137	82.1 (110.0)
								II	-12.0	0.137	87.6 (120.0)
								III	≈100	-	-
2	980601	05:34:02	52.81	160.37	31	6.9	140	II	-1.0	0.116	8.6 (10.0)
3	990308	12:25:42	51.93	159.72	7	7.0	164	II	-1.7	0.113	15.0 (17.0)
4	001220	09:19:51	53.31	160.06	65	4.6*	128	II	0.6	0.110	-5.4 (-6.0)
5	030616	22:08:01	55.30	160.34	190	6.9	328	II	-0.3	0.096	3.1 (3.0)
	030925	19:50:06	41.78	143.91	27	8.3	1667	IV	2.0	-	-
6	040320	08:53:14	53.74	160.74	31	4.9*	169	II	0.25	0.105	-2.4 (-2.5)
	041226	00:58:53	3.30	95.78	30	9.0	8251	IV	5.0	-	-

\* - магнитуда  $M_S$ ; \*\* - в скобках указаны величины деформации  $D$  при  $A_S=0.1$  см/10<sup>-9</sup>.

Такие особенности в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 требуют объяснения гидрогеодинамических процессов в системе скважина-резервуар под влиянием землетрясений в рамках обобщенной модели. Разработка такой модели включает: 1 - оценку упругих и фильтрационных свойств вскрытого резервуара; 2 - оценку степени инерционности водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод; 3 - объяснение особенностей гидрогеодинамических процессов в резервуаре при различных механизмах сейсмического воздействия. Важными элементами модели являются обоснование недренированного статически изолированного отклика уровня воды на вариации порового давления и количественная оценка деформометрических свойств системы скважина-резервуар. В качестве деформометрических свойств системы скважина-резервуар рассматриваются частотный диапазон проявления статически изолированного отклика уровня воды на вариации порового давления и величина его деформометрической чувствительности.

Оценка диапазона периодов, в котором проявляется статически изолированный отклик уровня воды, производится по частотной зависимости его барометрического отклика [13]. Вариации атмосферного давления рассматриваются в качестве сигнала, вызывающего изменение нагрузки на зеркало воды в скважине и изменение вертикальной компоненты напряжения во вскрытом резервуаре в диапазоне периодов от десятков минут до десятков суток. По поведению амплитудно-частотной передаточной функции (АЧПФ) от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды, а именно по наличию интервала частот или периодов, в котором АЧПФ максимальна и постоянна, выделяется диапазон, который не искажается гидрогеодинамическими факторами-помехами. Такой отклик уровня воды в скважине называется недренированным, т. е. соответствующим условиям отсутствия течения воды в резервуаре, и статически изолированным, т. е. не подверженным влиянию процессов формирования напора во вскрытом резервуаре [13].

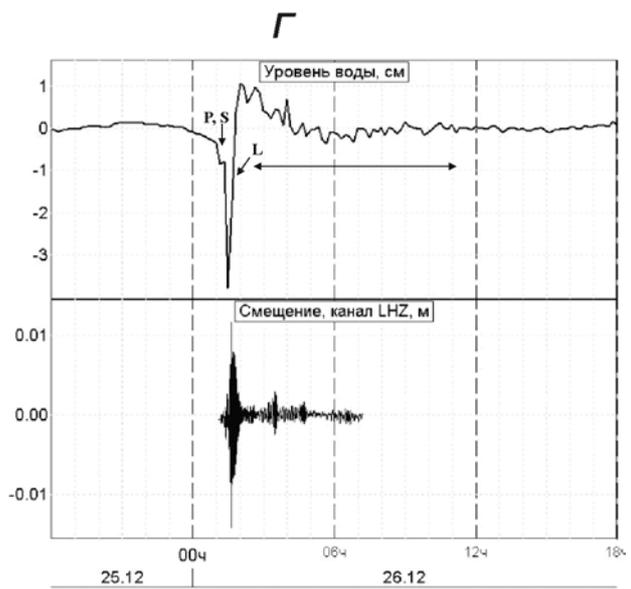
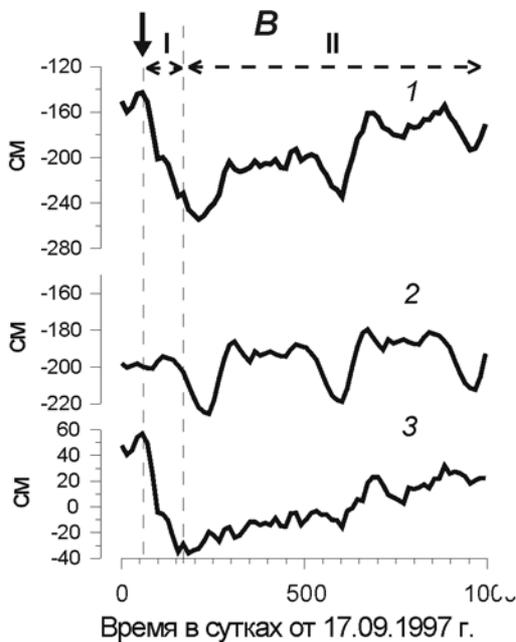
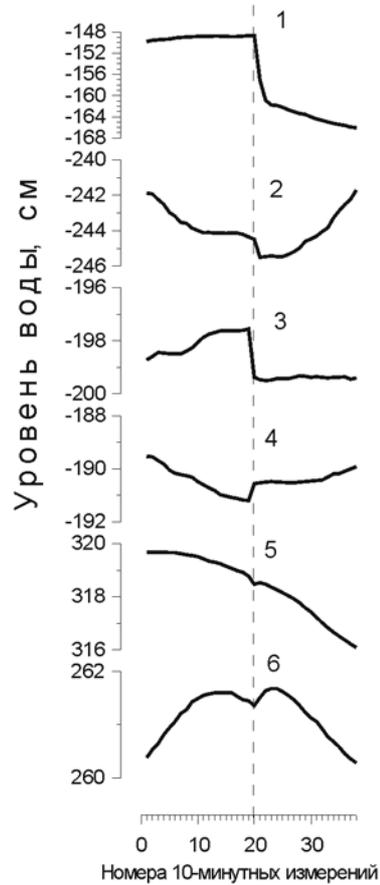
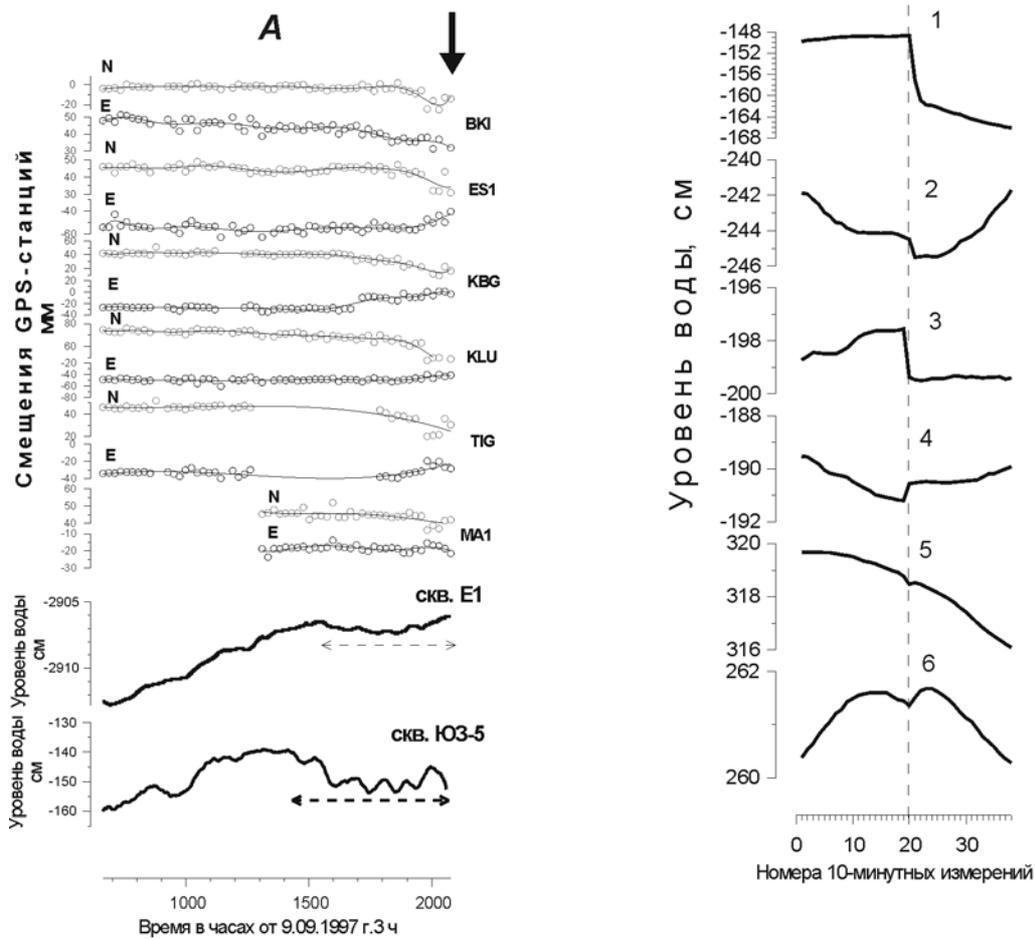


Рис. 1. Типы вариаций уровня воды в скважине Ю3-5 под влиянием землетрясений [4]. А – тип I – гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения (№1 в табл.) – показан толстой пунктирной линией (приводится в сопоставлении с перемещениями GPS-станций [11] и вариациями уровня воды в скважине E1); Б – тип II - косейсмические скачки уровня воды (цифры соответствуют номерам землетрясений в табл.); В – тип III - понижение уровня воды после Кроноцкого землетрясения в течение 3.5 мес. (I) и его последующее восстановление в течение двух лет (II): 1 – данные наблюдений, 2 – выделенные годовая сезонность и линейный тренд, 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда; Г – тип IV - вынужденные и свободные колебания уровня воды в результате Суматранского землетрясения 26.12.2004 г.,  $M=9$ ,  $R=8250$  км в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, с/ст. Петропавловск (горизонтальной линией выделены вынужденные колебания уровня воды).

В диапазоне периодов, соответствующих условиям недренированного статически изолированного отклика уровня воды, имеет место линейная связь между деформацией водовмещающих пород, изменением порового давления и вариациями уровня воды в скважине. Если диапазон недренированного статически изолированного отклика уровня воды включает земноприливные периоды ( $\approx 12-28$  ч), то величина амплитудного соотношения между отдельными компонентами приливных вариаций уровня воды и соответствующими величинами объемной деформации может рассматриваться в качестве нормирующего коэффициента для оценки объемной деформации насыщенных пород по формуле:

$$D = -\frac{\Delta h}{A_s}, \quad (1)$$

где  $D$  - объемная деформация в нанострейнах: «+» соответствует расширению, «-» - соответствует сжатию;  $\Delta h$  - изменение уровня воды в см: «+» соответствует повышению уровня воды, «-» соответствует понижению уровня воды;  $A_s$  - приливная деформометрическая чувствительность в см/нанострейн или см/ $10^{-9}$ . Величина  $A_s$  определяется по результатам приливного анализа вариаций уровня воды [6, 13]. Формула (1) справедлива во всем диапазоне проявления недренированного статически изолированного отклика уровня воды на изменения НДСС.

### Оценка свойств резервуара и инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод

В [6] приводится оценка деформометрических, упругих и фильтрационных свойств вскрытого резервуара на основании анализа приливного и барометрического откликов уровня воды в скважине ЮЗ-5 и применения формул теории пороупругости для недренированных условий. Получены следующие величины:

барометрическая эффективность $E_b$ , см/мбар	0.37
приливная деформометрическая чувствительность $A_s$ , см/ $10^{-9}$	0.09-0.15, в среднем 0.10
диапазон периодов проявления недренированного отклика уровня воды по частотной зависимости барометрического отклика	от менее 6 ч до первых десятков суток
модуль сдвига $G$ , Па	$0.43 \cdot 10^{10}$
удельная упругая емкость $S_s$ , $m^{-1}$	$20 \cdot 10^{-7}$
дренированная сжимаемость скелета $\beta$ , $Pa^{-1}$	$14.9 \cdot 10^{-11}$
пористость, $\phi$	0.12
водопроницаемость $T/r_w^2$ , $c^{-1}$	$2.8 \cdot 10^{-5} - 2.8 \cdot 10^{-2}$

Уточнение водопроницаемости резервуара  $T$  проводилось по данным откачки из скважины по окончании бурения. Дебит откачки  $Q$  составлял  $0.00148$  м<sup>3</sup>/с при понижении уровня воды  $S=17.55$  м. Оценка величины водопроницаемости резервуара  $T = km$ , где  $k$  - коэффициент фильтрации,  $m$  - вскрытая мощность резервуара, проводилась по модели линейного стока для неограниченного резервуара [8, с. 93]:

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

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 (2) величина  $T=9 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Отсюда величина  $k=9 \cdot 10^{-7}$  м/с, а величина  $T/r_w^2 = 1 \cdot 10^{-2}$  с<sup>-1</sup>. Таким образом, величина  $T/r_w^2$ , полученная по данным откачки, соответствует диапазону значений, оцененному по приливным и барометрическим вариациям уровня воды.

Искажение отклика уровня воды на изменения НДСС в области малых периодов объясняется инерционными эффектами водообмена между скважиной и резервуаром при соответствующих вариациях порового давления. При этом инерционный эффект характеризуется

отношением пикового изменения уровня воды в скважине  $x_0$  к пиковому изменению напора в резервуаре  $h_0 = p_0 / \rho g$ , где  $p_0$  - амплитуда изменения порового давления,  $\rho$  - плотность жидкости,  $g$  - гравитационное ускорение; а также фазовым сдвигом  $\eta$  между  $x_0$  и  $h_0$ . Величины  $x_0/h_0$  и  $\eta$  зависят от параметров резервуара – его водопроницаемости  $T$  и удельной упругой емкости  $S_s$ , а также от геометрических размеров скважины.

Оценка нижней границы статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 по поведению АЧПФ от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (примерно 6 ч, см. рис. 3 а в [6]) представляется недостаточно надежной из-за двойного и разнонаправленного механизма формирования барометрического отклика - через прямое воздействие атмосферного давления на зеркало воды в скважине и путем передачи давления на резервуар через слабопроницаемую кровлю.

Для уточнения параметров инерционности водообмена между скважиной и резервуаром выполнено моделирование реакции уровня воды в скважине ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления по модели [12]. Результаты моделирования с учетом геометрических параметров скважины ЮЗ-5 и параметров резервуара показывают (рис. 2), что на периодах меньше 1 мин скважина работает как низкочастотный фильтр (амплитудное соотношение  $x_0/h_0 < 0.5$ ,  $\eta > 60^\circ$ ). На периодах от 1 мин до первых десятков минут величина  $x_0/h_0$  возрастает от 0.5 до единицы, а величина  $\eta$  приближается к  $0^\circ$ . Отсюда следует, что инерционные эффекты водообмена при периодических изменениях порового давления имеют существенное значение для скважины ЮЗ-5 в диапазоне периодов не более первых минут. На больших периодах - от минут до первых десятков суток, т. е. до верхней границы проявления статически изолированного отклика уровня воды, инерционные эффекты водообмена не оказывают искажающего воздействия на деформометрические свойства скважины ЮЗ-5.

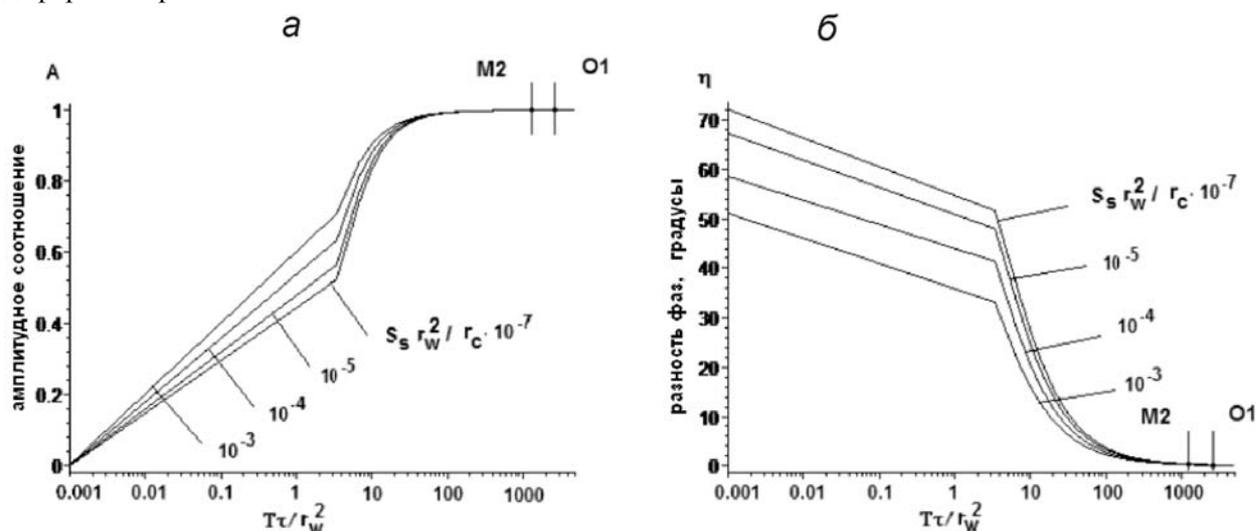


Рис. 2. График амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 и напором в резервуаре  $x_0/h_0$  (а) и фазового сдвига  $\eta$  (б) при различных значениях  $T\tau/r_w^2$  и  $S_s r_w^2/r_c$ : M2, O1 – приливные волны с периодами 12.42 ч и 25.82 ч соответственно.

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

*Косейсмические скачки, тип II.* При возникновении шести местных землетрясений (рис. 1 Б, табл.) наблюдались скачки в изменении уровня воды во время 10-минутного интервала, в течение которого происходило землетрясение. Исключение составляет косейсмический скачок уровня воды во время Кроноцкого землетрясения, который фиксировался в течение двух 10-минутных интервалов регистрации, и его максимальная продолжительность могла составлять до тринадцати минут [5]. В четырех случаях уровень понижался, в двух случаях – повышался. Амплитуды скачков  $\Delta h$  составляли 12.0-0.25 см.

Так как процессы водообмена между скважиной и резервуаром не оказывают существенного влияния на отклик уровня воды на периодах в первые минуты, то это позволяет

применять формулу (1) для оценки косейсмической деформации резервуара по амплитуде косейсмического скачка (табл.). Для всех шести землетрясений по (1) оценены величины косейсмической деформации ( $D=87.4-2.4 \cdot 10^{-9}$ ), а также характер деформации резервуара по направлению изменения уровня воды. Понижение уровня воды фиксирует деформацию расширения резервуара, повышение уровня воды – его сжатие. Для пяти из шести землетрясений (табл.) после косейсмического скачка не наблюдались какие-либо остаточные смещения уровня воды. Это указывает на то, что физический механизм формирования косейсмических скачков соответствует отклику порового давления в резервуаре на преимущественно упругую деформацию водовмещающих пород при образовании сейсмического разрыва в очаге землетрясения.

*Гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения, тип I.* Перед Кроноцким землетрясением наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 продолжительностью около двадцати суток, синхронное с понижением уровня воды в скважине Е1 (рис. 1 А). Понижение уровня воды в обеих скважинах по времени примерно совпадает с предсейсмическими перемещениями GPS-станций Камчатской сети, представляющими проявление деформационного предвестника этого землетрясения [11]. Максимальная амплитуда понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 в течение двадцати суток составила 11 см. 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. Эта величина составляет примерно  $1.1 \cdot 10^{-7}$  (табл.).

*Колебания уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений, тип IV.* При определенных соотношениях параметров резервуара и скважины на периодах поверхностных сейсмических волн 1-30 с амплитудное соотношение  $x_0/h_0$  из-за резонанса в системе скважина-резервуар может превышать единицу и достигать сотен единиц [10]. В случае скважины ЮЗ-5 резонансное увеличение амплитудного соотношения не ожидается (рис. 2). Это указывает на то, что при данных геометрических размерах скважины и величинах параметров резервуара сигналы от поверхностных сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 регистрироваться не могут. Это находится в противоречии с тремя случаями проявления эффектов типа IV, которые наблюдались в связи с землетрясениями с  $M=8.3-9.0$ , произошедших на гипоцентральных расстояниях  $R=1670-8250$  км (рис. 1 Г, табл.).

В работе [10] показано, что 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  $h_0$  - амплитуда изменения напора, вызванная деформацией водовмещающих пород при прохождении сейсмических волн.

Резонансная частота  $\omega_w$  зависит 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 выражением  $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$ . Отсюда можно оценить периоды сейсмических волн, которые могут вызывать резонансные эффекты в изменениях уровня воды:  $\tau \geq 2\pi/\omega_w$ . В случае скважины ЮЗ-5 резонансный эффект может возникать при прохождении волн с периодом не менее 44.6 с. В спектре записи Суматранского землетрясения 26.12.2004 г. на канале LHZ (с/ст. Петропавловск) поверхностные волны с такими периодами присутствуют [7].

Усиление вариаций уровня воды в скважине по отношению к изменению напора в резервуаре для резонансных частот ( $A$ ) выражается по [10] как

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

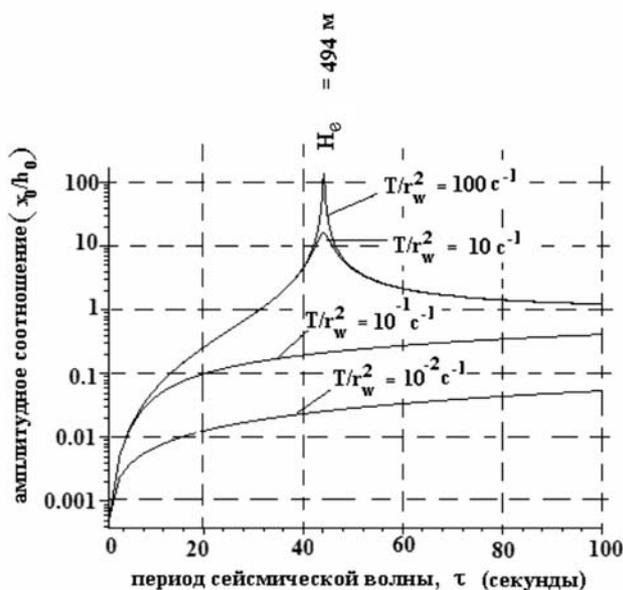
где  $\alpha_w = r_w (\omega S_s / T)^{1/2}$  - безразмерная функция частоты, выраженная через параметры резервуара и геометрические параметры скважины,  $Ke\alpha_w$ ,  $Kei\alpha_w$  - действительная и мнимая части функции Кельвина нулевого порядка.

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

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

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  $A' = A \geq 2.5$  (т. е.  $A'$  соответствует отношению максимальной амплитуды изменения уровня воды при прохождении сейсмических волн к максимальной амплитуде смещения поверхности земли [7]), то можно по (3) оценить водопроницаемость резервуара подземных вод, вскрытого скважины ЮЗ-5. Для этого рассчитывалась зависимость усиления вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре  $A = x_0/h_0$ , в зависимости от периода сейсмической волны  $\tau$  (рис. 3). Принималось,



что величина водопроницаемости резервуара может изменяться в диапазоне четырех порядков, а величина удельной упругой ёмкости  $S_s$  постоянна и составляет  $20 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ .

Рис. 3. 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  $\tau$ .

Результаты моделирования показывают, что усиление вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре могло произойти при величине  $T/r_w^2$  не менее  $10 \text{ с}^{-1}$ .

Сопоставление величин водопроницаемости резервуара, полученных по данным откачки, приливному и барометрическому анализу вариаций уровня воды ( $1.0-2.8 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ ), с величиной водопроницаемости, оцененной по амплитуде изменения уровня воды при прохождении сейсмических волн от Суматранского землетрясения ( $10 \text{ с}^{-1}$ ), показывает, что они различаются на три порядка. Различие в величинах водопроницаемости можно объяснить на основе предположения о резком увеличении проницаемости водовмещающих пород в случае прохождения поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений. В качестве механизма увеличения водопроницаемости рассматривается образование микрогидроразрывов в насыщенных породах при задержке понижения порового давления по отношению к понижению общего давления в среде, вызванного прохождением низкочастотных поверхностных волн [7]. В этом случае эффективное напряжение в скелете породы резко возрастает и может превысить предел прочности. Незначительное остаточное смещение в положении уровня воды после Суматранского землетрясения указывает на правомочность такого предположения.

*Длительное понижение уровня воды с последующим восстановлением после Кроноцкого землетрясения, тип III.* Понижение уровня воды в течение 3.5 месяцев с амплитудой около одного метра после Кроноцкого землетрясения и его последующее двухлетнее восстановление (рис. 1 В) отражает процесс падения и восстановления порового давления в резервуаре и нуждается в объяснении механизма формирования таких изменений в состоянии подземных вод.

Если принять гипотезу о статическом воздействии Кроноцкого землетрясения на напорный резервуар подземных вод, то трехмесячное понижение уровня воды можно объяснить деформацией расширения водонасыщенных пород и падением порового давления в расширенном

радиусе чувствительности скважины. В этом случае, величина косейсмической деформации резервуара составляет не менее  $10^{-6}$  и на порядок превышает величину, полученную по косейсмическому скачку ( $\approx 0.88-1.20 \cdot 10^{-7}$ ). Но такой механизм представляется маловероятным из-за достаточно высокой пьезопроводности вскрытого резервуара, благодаря которой кратковременный импульс в изменении статического напряженного состояния резервуара относительно быстро компенсируется более мощным процессом формирования гидростатического напора.

Более вероятными процессами, вызвавшими длительное понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5, являются увеличение проницаемости водовмещающих пород резервуара при сейсмических сотрясениях и подстройка порового давления к изменившимся фильтрационным свойствам. Восстановление уровня воды в течение двух лет после достижения минимума обусловлено релаксацией порового давления за счет высокой стабильности гидрогеодинамического режима напорного резервуара. Эта стабильность обусловлена относительным постоянством гидрогеодинамических условий в областях питания и разгрузки подземных вод в меловых отложениях и их сезонными изменениями. Именно гидрогеодинамические условия в областях питания и разгрузки задают величину напора в подземных водах в районе скважины. Поэтому двухлетнее повышение уровня воды может отражать процесс восстановления порового давления в резервуаре в соответствии со средней величиной напора.

### **Обсуждение результатов**

Исследование гидрогеодинамических процессов в резервуаре подземных вод на основе данных о вариациях уровня воды в скважине ЮЗ-5 и математического моделирования позволяет предложить феноменологическую модель поведения системы скважина-резервуар при различных механизмах сейсмического воздействия. В основе модели лежит представление о наличии недренированных условий в резервуаре и о проявлении статически изолированного отклика уровня воды при относительно медленных изменениях НДС в достаточно широком диапазоне вариаций. Нижняя граница статически изолированного отклика уровня воды определяется инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром и соответствует периодам не более первых минут. Верхняя граница статически изолированного отклика уровня воды соответствует периодам в первые десятки суток (не более 25-30 суток). На периодах от минут до первых десятков суток система скважина-резервуар ведет себя подобно объемному деформографу. Это позволяет оценивать косейсмическую и предсейсмическую деформацию водонасыщенных пород при амплитудах деформации от первых единиц  $10^{-9}$  и более по данным о вариациях уровня воды, соответствующих типам I и II (табл.), и величине приливной деформометрической чувствительности  $A_S$ .

Образование разрывов в очагах землетрясений вызывает изменение статического напряженного состояния насыщенных пород верхнемелового возраста и их упругую деформацию, которая вызывает изменение порового давления в резервуаре и соответствующие скачки в изменениях уровня воды. При этом амплитуды скачков примерно соответствуют полному отклику уровня воды на изменение порового давления, либо являются оценкой его нижней границы. Для содержательного обсуждения этого вопроса необходимо производить более частую регистрацию вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 для установления точной формы косейсмического скачка.

Формирование гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения сопровождалось развитием деформации расширения насыщенных пород резервуара с амплитудой порядка  $1 \cdot 10^{-7}$ . Скорее всего, такая деформация развивалась по механизму трещинной дилатансии [1] и сопровождалась ростом проницаемости водовмещающих пород. При упругой деформации водонасыщенных пород такое длительное существование импульса порового давления в резервуаре представляется маловероятным. Гидрогеодинамический предвестник имеет характерный период около двадцати суток. Это примерно соответствует верхней границе проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5. Бухтообразная форма гидрогеодинамического предвестника, т. е. относительное замедление в понижении уровня воды на стадии, непосредственно предшествующей землетрясению, вероятнее всего, обусловлена наложением предсейсмической дилатансии в насыщенных горных породах на сезонный восходящий тренд уровня воды [4]. Но можно предполагать и то, что в это время скорость дилатансии в водовмещающих породах относительно замедлилась за счет развития компенсационных механизмов в резервуаре, например, за счет локальных течений воды и

кольматации новообразованных трещин мелкими частицами горной породы. Проявление этого вопроса возможно при накоплении данных о проявлениях гидрогеодинамических предвестников в вариациях уровня воды в скважине ЮЗ-5, а также при наличии дополнительной информации о величинах и характере предсейсмической деформации в водонасыщенных породах.

Прохождение низкочастотных поверхностных волн от сильных удаленных землетрясений с периодами не менее 40 с вызывают вынужденные колебания уровня воды в скважине за счет усиления вариаций порового давления в системе скважина-резервуар. Этому способствует также резкое повышение проницаемости водонасыщенных пород во время вступления поверхностных волн и кратковременное увеличение водопроницаемости резервуара. Незначительное и кратковременное смещение уровня воды относительно его начального положения после прохождения сейсмических волн указывает на малую продолжительность развития такого процесса (рис. 1 Г). По-видимому, уже на стадии вынужденных колебаний уровня воды происходит восстановление исходной проницаемости в меловых породах.

Наименее ясным по механизму формирования является 3.5-месячное понижение уровня воды и его последующее двухлетнее восстановление после Кроноцкого землетрясения (тип III). Очевидно, что такое изменение связано с существенным изменением проницаемости пород резервуара на значительной площади. Если предположить, что в результате Кроноцкого землетрясения произошло увеличение проницаемости всей водонасыщенной толщи верхнемеловых пород и соответствующее падение порового давления, то понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 отражает увеличение радиуса взаимосвязи отдельных зон резервуара по соответствующему гидродинамическому возмущению во времени. По величинам времени развития понижения уровня воды  $t=8.6 \cdot 10^6$  с и пьезопроводности резервуара  $a = k / S_s = 0.1$  м<sup>2</sup>/с можно оценить радиус чувствительности скважины ЮЗ-5 к соответствующему гидродинамическому возмущению по формуле  $R \approx \sqrt{at} \approx 930$  м.

### Список литературы

1. Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 1. С. 5-14.
2. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58-69.
3. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39-52.
4. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважинах под влиянием землетрясений // Вестник КРАУНЦ Серия наук о Земле. 2005. № 5. С. 113-126.
5. 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.
6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным равномерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 405 – 421.
7. Копылова Г.Н. Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 на катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г., M=9 // Матер. ежегодной конференции, посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. С. 140-147.
8. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука, 1983. 241 с.
9. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
10. 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.
11. Gordeev E. I., Gusev A. A., Levin V. E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189-198.
12. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.
13. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177-209.
14. Wakita H. Water level as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. №. 189. P. 553-555.