

УДК 556.33:550.348

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА, ВЫЗВАННЫЕ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ (ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 1997-2004 гг.)

Г.Н. Копылова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский,
683006, E-mail: gala@emsd.iks.ru*

В 1997-2004 гг. на скважине ЮЗ-5 (Восточная Камчатка, 53.169° с.ш., 158.414° в.д., глубина 800 м) проводились уровнемерные наблюдения с целью обнаружения сейсмотектонической деформации и поиска предвестников землетрясений [4]. В настоящем сообщении дается оценка деформометрической способности наблюдательной системы «скважина-резервуар» на основании анализа барометрического и приливного откликов

уровня воды и приводится характеристика выявленных изменений уровня воды, проявляющихся при подготовке и возникновении землетрясений.

Характеристика скважины ЮЗ-5 и системы наблюдений

Скважина вскрывает в интервале глубин 0-270 м толщу рыхлых четвертичных отложений, в которой предполагается наличие грунтового водоносного горизонта. В интервале глубин 270-800 м распространены верхнемеловые породы, представленные чередованием слоев туфоалевролитов и филлитовидных сланцев. В верхнемеловых породах распространены напорные подземные воды. Слои трещиноватых туфоалевролитов обладают повышенной водообильностью. Именно к ним приурочены зоны водопритоков. Суммарная мощность зон водопритоков составляет 109 м.

Скважина обсажена металлической колонной до глубины 310 м. В интервале глубин 310-800 м ствол скважины открыт и связан с резервуаром напорных подземных вод в меловых отложениях. При откачке удельный дебит скважины составил 0.084 л/с при понижении 17.5 м. Водопроницаемость резервуара составляет $9 \cdot 10^{-5}$ м²/с, пористость водовмещающих пород - 12% [5]. Уровень воды находится на глубине около 1 м ниже поверхности земли.

Данные бурения и опробования показывают, что скважина ЮЗ-5 вскрывает гидравлически связанный резервуар напорных холодных вод в меловых отложениях с гидростатическим распределением порового давления по глубине. Вскрытые подземные воды формируются без влияния тепловых аномалий в условиях активного водообмена. Об этом свидетельствуют хлоридно-гидрокарбонатный натриевый состав и низкая минерализация воды (0.22 г/л), пониженные величины концентрации кремниевой кислоты ($H_4SiO_4=5$ мг/л), температуры воды (до 22.5°C на глубине 800 м) и геотермического градиента (2°/100 м). Скважина интересна тем, что может быть репрезентативной по отношению к условиям формирования режима холодных напорных вод сейсмоактивных регионов, имеющих более широкое распространение по сравнению с термальными и минеральными водами.

В 1997-2002 гг. для измерений уровня воды применялся датчик ДУ, разработанный в ИФЗ РАН, г. Москва [1]. В мае 2003 г. на скважине установлен универсальный регистратор Кедр А2 (ООО «Полином», г. Хабаровск), оборудованный ультразвуковым датчиком уровня воды [3]. В течение всего времени проводились синхронные измерения уровня воды и атмосферного давления с частотой 10 минут. Точность регистрации уровня воды составляла ± 0.2 см для датчика ДУ и ± 0.1 см для ультразвукового датчика. Проводились также ручные замеры уровня воды с частотой 1 раз в 14 суток. Точность ручных измерений уровня воды составляла ± 0.5 см.

Оценка деформометрических свойств наблюдательной системы «скважина-резервуар» проводилась на основе изучения барометрического и приливного откликов уровня воды. Изучение барометрического отклика уровня воды было направлено на оценку величины барометрической эффективности E_b и ее зависимости от частоты [9]. Для этого выполнялся кросс-спектральный анализ вариаций уровня воды и атмосферного давления (рис. 1).

Барометрическая эффективность определяется упругими свойствами вскрытого резервуара подземных вод, степенью его изоляции от влияния грунтовых вод и инерционными эффектами водообмена между скважиной и резервуаром [5,9]. Величина E_b оценивалась по поведению амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (рис. 1 б) и оставалась постоянной (0.37-0.40 см/мбар) на периодах от 6 часов до 10-12 суток для всего времени наблюдений. В этом диапазоне величина квадрата модуля спектра когерентности вариаций уровня воды и атмосферного давления составляет 0.98 (рис. 1 а) при разности фаз 180° (рис. 1 в). Постоянство величины E_b в диапазоне периодов часы-сутки указывает на отсутствие гидравлической связи между вскрытым резервуаром и грунтовым водоносным горизонтом.

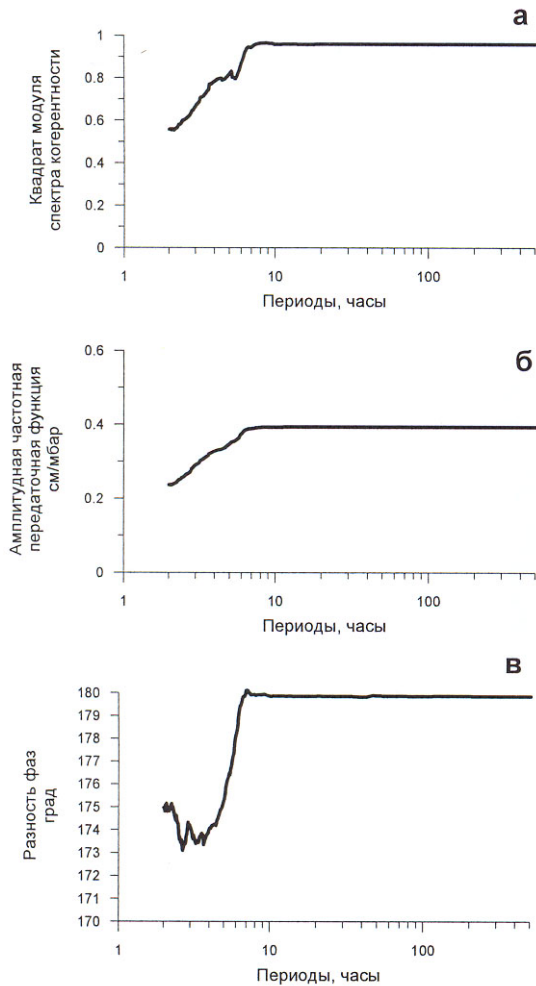
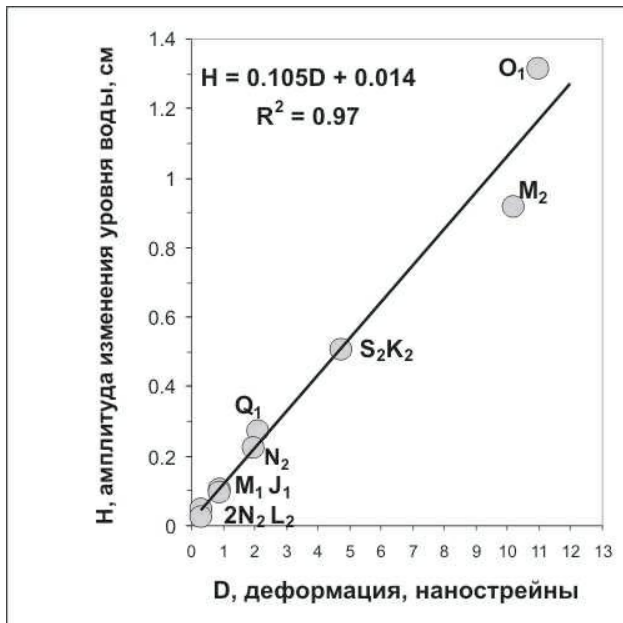


Рис. 1. Результаты кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления на скв. ЮЗ-5 в диапазоне периодов 2-500 ч.: а - квадрат модуля спектра когерентности; б - амплитудная частотная передаточная функция от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды; в - разность фаз между вариациями атмосферного давления и уровня воды.

Результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления позволяют сделать важный вывод о наличии статически изолированного отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5 на изменение напряженно-деформированного состояния вскрытого резервуара. Поэтому можно ожидать, что в диапазоне периодов часы-сутки скважина будет работать как деформограф без существенных искажений.

Наличие приливных изменений уровня воды позволяет получить количественную характеристику деформометрической чувствительности вариаций уровня воды в диапазоне проявления статически изолированного отклика. В изменениях уровня воды скв. ЮЗ-5 выделены вариации, соответствующие приливным волнам $Q_1, O_1, M_1, J_1, OO_1, 2N_2, N_2, M_2, L_2, S_2K_2$ [4,11]. Величины приливной деформометрической чувствительности для отдельных волн изменяются от 0.09 до $0.15 \text{ см}/10^{-9}$ при характерной величине для всего приливного диапазона $0.1 \text{ см}/10^{-9}$ (рис. 2) [5]. Точность регистрации вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 составляет $0.2-0.1 \text{ см}$, поэтому можно ожидать заметные изменения уровня воды при деформации вскрытого резервуара не менее первых единиц 10^{-9} .

Рис. 2. Соотношение амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 (H) и амплитуд теоретической приливной деформации в районе скважины (D).



Механизмы сейсмического воздействия на подземные воды

По литературным данным известно не менее трех механизмов воздействия землетрясений на подземные воды.

1. *Динамическое воздействие* связано с прохождением сейсмических волн, вызывающих импульсы сжатия – расширения водонасыщенных пород и соответствующие изменения уровней воды в скважинах. Это воздействие связывается, в основном, с поверхностными волнами от относительно сильных землетрясений; его дальное действие может составлять до тысяч километров [6].

2. *Статическое воздействие* связано с образованием разрывов в очагах землетрясений и с изменением статического напряженного состояния резервуаров

подземных вод. При этом распределение зон косейсмического сжатия и расширения определяется, в основном, механизмом очага землетрясения [10]. Этот эффект может проявляться в напорных подземных водах на расстояниях не более первых сотен километров от эпицентральной области.

3. Третий механизм может быть связан с процессами подготовки сильных землетрясений. Известно, что на стадии подготовки землетрясений могут возникать деформации, которые вызывают дилатансию водовмещающих пород, изменение структуры порового пространства и фильтрационных связей [8]. Эти процессы также могут проявляться в изменениях уровней воды в скважинах.

Данные наблюдений и типы сейсмического воздействия, проявившиеся в изменениях уровня воды скважины ЮЗ-5

В многолетних изменениях уровня воды выделяются годовые вариации, связанные с сезонным режимом питания и расходования подземных вод (рис. 3). Их амплитуды составляют 30-40 см. Минимальные отметки уровня воды отмечаются в конце апреля, максимальные - в июле. Амплитуды приливных вариаций уровня воды составляют 2-8 см в сутки. В зависимости от интенсивности изменений атмосферного давления барометрические вариации уровня воды могут составлять от первых сантиметров до первых десятков сантиметров на периодах в первые сутки. Повышение уровня воды с амплитудами 1-5 см в течение первых суток может вызываться нагрузочным воздействием осадков не менее 10-20 мм/сутки.

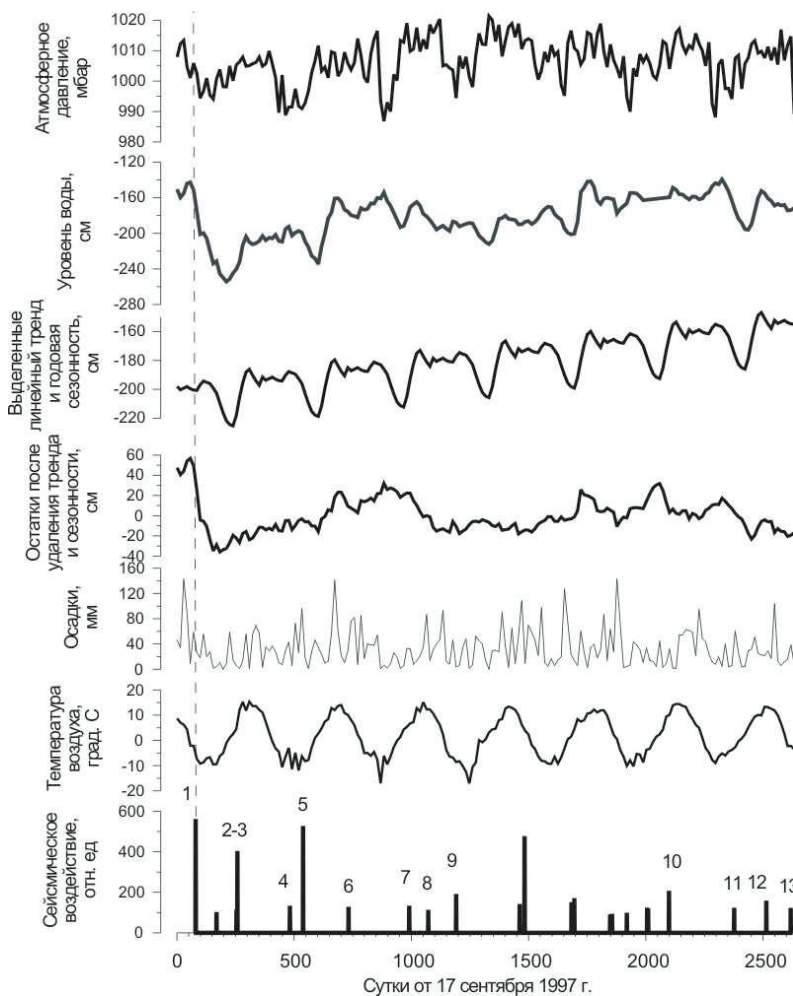


Рис. 3. Данные наблюдений за вариациями уровня воды в скважине ЮЗ-5 в 1997-2004 гг. в сопоставлении с сейсмичностью и изменениями гидрометеорологических параметров: атмосферным давлением, температурой воздуха, осадками. Частота представления данных - одно значение в 14 суток. Столбиками указаны моменты наиболее сильных землетрясений. Высота столбика характеризует относительное воздействие землетрясений в районе скважины: $10^{K/2} / R^2$, где K - энергетический класс землетрясения, R - гипоцентрального расстояние в км. Вертикальная пунктирная линия - Кроноцкое землетрясение 5.12.1997 г.

В изменениях уровня воды скв. ЮЗ-5 обнаружены вариации в связи с девятью землетрясениями (таблица). Выявленные вариации разделены на четыре типа в соответствии с известными механизмами сейсмического воздействия (типы 2-4), а также дополнительно выделен тип долговременных изменений в состоянии

подземных вод после сильнейшего за время наблюдений Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. (тип 1).

Землетрясения, вызвавшие изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 за период с сентября 1997 г. по март 2005 г.

№ на рис. 3	Дата гГММДД	Координаты, град.		Глубина Н, км	M _s	M _w	Гипоцентральное расстояние до скв. ЮЗ-5, R, км	Характер изменения уровня воды в соответствии с выделенными типами
		с. ш	в. д.					
1	971205	54.64	162.55	10	7.9	7.8	316	T4, T3, T1
3	980601	52.81	160.37	31	6.6	6.9	140	T3
5	990308	51.91	159.77	7	7.1	7.0	164	T3
9	001220	53.31	160.06	65	4.6	-	128	T3
10	030616	55.30	160.34	190	6.2	6.9	328	T3
	030925	41.78	143.91	27	-	8.3	1667	T2
11	040320	53.74	160.74	31	4.9	-	169	T3
	041226	3.30	95.78	10	8.5	9.0	8251	T2
	050328	2.08	97.01	30	8.2	8.7	8200	T2

Тип 1 - длительные изменения. После Кроноцкого землетрясения (№ 1 в таблице и на рис. 3) уровень воды понижался в течение 3.5 месяцев с амплитудой около 1 м; затем в течение двух лет наблюдалось его возвращение к прежнему положению (см. временной ряд остатков в изменении уровня воды после удаления сезонных вариаций). Это указывает на значительные и долговременные изменения в состоянии вскрытого резервуара подземных вод после Кроноцкого землетрясения.

Тип 2 - динамическое воздействие сейсмических волн. В связи с тремя землетрясениями: 1 - 25.09.03 г., M=8.3, R=1670 км, о. Хоккайдо; 2 - 26.12.2004 г., M=9, R=8250 км (рис. 4) и 3 - 28.03.05 г., M=8.7, R=8200 км, о. Суматра, обнаружены вариации уровня воды продолжительностью 3-11 часов. Максимальные амплитуды изменений уровня воды (1-5 см) наблюдались во время вступления поверхностных волн, затем в течение часов происходили свободные колебания столба воды в скважине [5]. Более подробная характеристика данного эффекта приводится в [2].

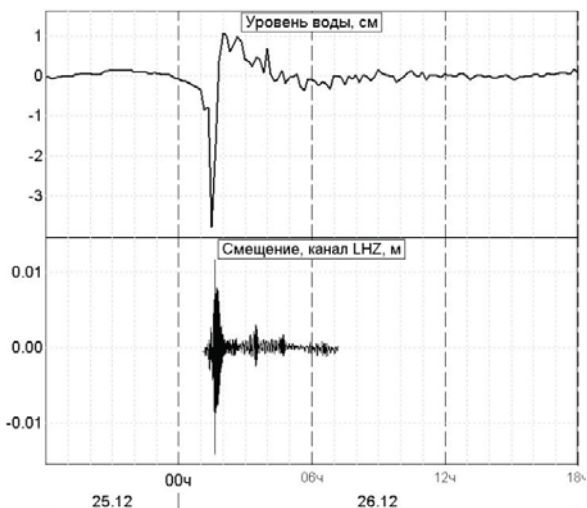


Рис. 4. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время землетрясения 26.12.2004 г., M_w=9, о. Суматра, в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, с/ст. Петропавловск.

Тип 3 - статическое воздействие землетрясений на напряженное состояние резервуара. При возникновении шести местных землетрясений наблюдались скачки в изменении уровня воды во время 10-минутного интервала, в течение которого происходило землетрясение (рис. 5). В четырех случаях уровень понижался, в двух случаях - повышался. Амплитуды скачков составляли 12.0-0.25 см. Для этих землетрясений оценены величины косейсмической деформации по приливной деформометрической чувствительности и характер деформации резервуара по направлению изменения уровня воды. Понижение уровня воды фиксирует деформацию расширения резервуара, повышение уровня воды - его сжатие.

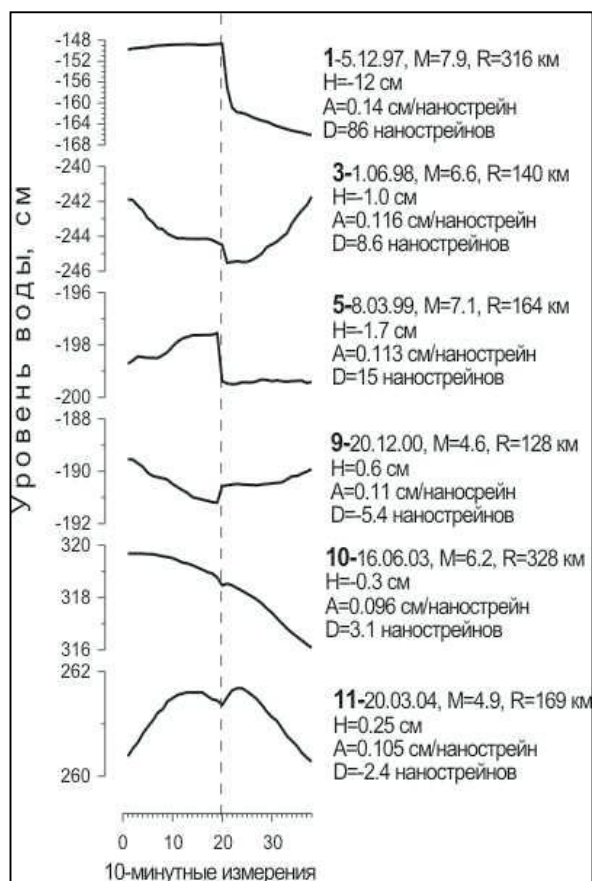


Рис. 5. Косейсмические скачки в изменении уровня воды в скважине ЮЗ-5 в моменты землетрясений. Номера землетрясений соответствуют номерам на рис. 3. Н - амплитуда изменения уровня воды, А - приливная деформометрическая чувствительность, D - косейсмическая деформация резервуара подземных вод: «+» - расширение, «-» - сжатие.

Тип 4 - гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения. Перед Кроноцким землетрясением проявились синхронные бухтообразные понижения уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 продолжительностью около трех недель [4]. По времени понижение уровней воды примерно совпадает с предсейсмическим перемещением GPS-станций Камчатской сети (рис. 6), представляющим проявление деформационного предвестника этого землетрясения [7].

Амплитуда понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 составила 11 см. В этом случае величина деформации расширения резервуара по приливной чувствительности на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения составляет $1.1 \cdot 10^{-7}$.

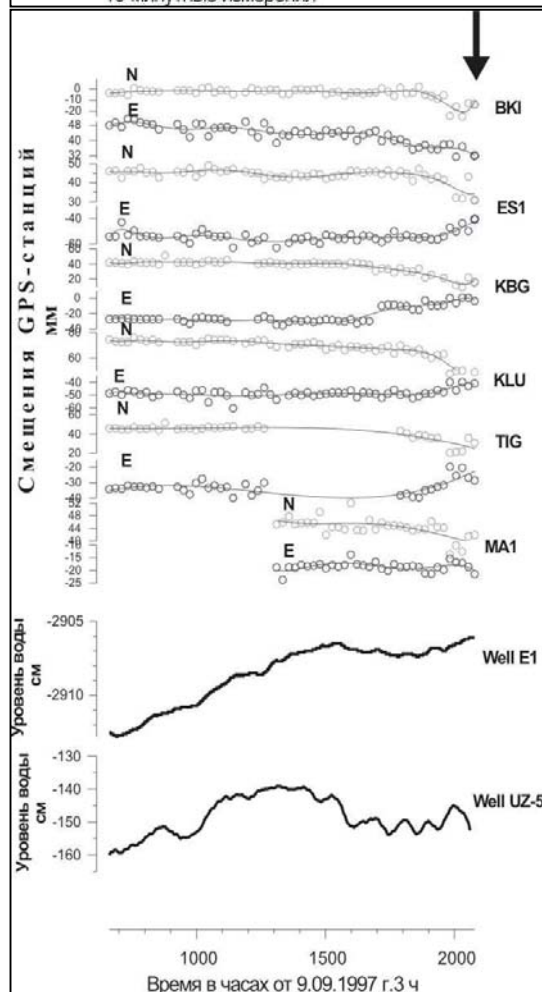


Рис. 6. Изменения уровней воды в скважинах Е1 (well E1), ЮЗ-5 (well UZ-5) и смещения GPS-станций на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.97 г., M=7.9 (показано стрелкой). VKI, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1 - GPS-станции Камчатской сети [7].

Обсуждение и выводы

1. На основе анализа барометрических, приливных и сейсмических вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 установлено наличие статически изолированного отклика уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния вскрытого резервуара подземных вод в диапазоне периодов от часов до десяти-пятнадцати суток. Оценка деформации резервуара по уровнемерным данным в этом диапазоне может проводиться по величине приливной деформометрической чувствительности $0.1 \text{ см}/10^{-9}$.

В диапазоне периодов от месяцев до первых лет изменения уровня воды контролируются, в основном, сезонным питанием и расходом подземных вод, а также постсейсмическими процессами в результате сильных землетрясений.

2. В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 проявились три типа эффектов в соответствии с известными механизмами сейсмического воздействия на подземные воды:

- тип 2 - эффект прохождения поверхностных сейсмических волн от удаленных сильных землетрясений (M=8.3-9.0, R=1670-8250 км);

- тип 3 - косейсмические скачки в моменты возникновения местных землетрясений ($M=4.6-7.9$, $R=128-316$ км);

- тип 4 - бухтообразное понижение уровня воды с амплитудой 11 см в течение трех недель на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=7.9$, $R=316$ км, являющееся проявлением гидрогеодинамического предвестника.

В особый тип вариаций уровня воды (тип 1) выделены долговременные изменения в состоянии подземных вод после Кроноцкого землетрясения.

Эффект прохождения поверхностных сейсмических волн в изменениях уровня воды (тип 2) вызывается только очень сильными и удаленными землетрясениями ($M=8.3-9.0$, $R=1670-8250$ км) и не проявляется при возникновении местных землетрясений. Изучение таких вариаций уровня воды позволяет уточнять параметры резервуара, в частности, его водопроницаемость [2,6].

По данным о косейсмическом изменении уровня воды во время возникновения местных землетрясений (тип 3) можно оценивать характер и величину косейсмической деформации резервуара подземных вод. Такая информация полезна для разработки моделей косейсмического деформирования континентальных районов Камчатки и уточнения механизмов очагов землетрясений [10].

Проявление гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 (тип 4), синхронного с проявлением деформационного предвестника, указывает на необходимость продолжения наблюдений на этих скважинах с целью привлечения данных равномерных наблюдений для мониторинга напряженно-деформированного состояния среды и оценки сейсмической опасности.

3. Понижение уровня воды в течение 3.5 месяцев с амплитудой около одного метра после Кроноцкого землетрясения и его последующее двухлетнее восстановление (тип 1, рис. 3) отражает процесс падения и восстановления порового давления в резервуаре и нуждается в объяснении механизма формирования таких изменений в состоянии подземных вод.

При статическом воздействии землетрясения на напорные подземные воды трехмесячное понижение уровня воды можно объяснить деформацией расширения резервуара 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 $0.86 \cdot 10^{-7}$. Понижение уровня воды после землетрясения также могло быть вызвано увеличением проницаемости водовмещающих пород резервуара и подстройкой порового давления к изменившимся фильтрационным свойствам. В этом случае оценка косейсмической деформации в расширенном радиусе чувствительности скважины представляется затруднительной в связи с изменением упругих свойств резервуара.

Восстановление уровня воды в течение двух лет после достижения минимума, по-видимому, связано с водным питанием резервуара. Наличие постоянных областей питания и разгрузки подземных вод в меловых отложениях задает среднюю величину напора в резервуаре в районе скважины. Поэтому двухлетнее повышение уровня воды может отражать процесс восстановления порового давления в резервуаре в соответствии с величиной напора.

Возможность проявления долговременных и амплитудных изменений в состоянии напорных резервуаров холодных пресных вод в результате сильных землетрясений необходимо учитывать не только при проведении гидрогеодинамического мониторинга, направленного на поиск предвестников землетрясений, но и при любых других видах использования подземных вод в сейсмоактивных регионах.

4. Подготовка и возникновение сильных местных землетрясений (например, в случае Кроноцкого землетрясения, $M=7.9$, $R=320$ км) сопровождается последовательным проявлением вариаций уровня воды, соответствующих типу 4 - гидрогеодинамический предвестник, типу 2 - косейсмический скачок и типу 1 - длительное восстановление порового давления в результате изменения напряженного состояния и фильтрационных свойств резервуара.

Список литературы

1. *Багмет А.Л., Багмет М.И., Барабанов В.Л. и др.* Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» // Физика Земли. 1989. № 11. С. 84-95.
2. *Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 на катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 г., М=9 (настоящий сборник).
3. *Калинов Г.А., Лысаков А.В., Римлянд В.И.* Способ ультразвукового измерения уровня жидкости. Патент на изобретение № 215962 от 24.11.1998 г.
4. *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.
5. *Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным уровнемерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 405-421.
6. *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.
7. *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 (1). P. 189-198.
8. *Roeloffs E.A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177-209.
9. *Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 13619-13634.
10. *Wakita H.* Water level as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. № 189. P. 553-555.
11. *Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719-8721.