

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2005 Г.Н. Копылова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006
 Адрес для переписки: 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, КФ ГС РАН,
 Копыловой Г.Н.; тел. (415-22)5-73-21; факс. (415-22)5-73-21; e-mail: gala@emsd.iks.ru

В течение 1997-2005 гг. Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН проводилась цифровая регистрация уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1, Камчатка, с целью мониторинга сеймотектонических процессов и поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. В статье описывается система сбора и обработки данных уровнемерных наблюдений; приводится характеристика выявленных эффектов в изменениях уровней воды под влиянием землетрясений. Представлен способ количественной оценки сеймотектонической деформации водовмещающих пород на основе оценки статически изолированного отклика и приливной деформометрической чувствительности вариаций уровней воды. В течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г., $M=7.9$ проявлялся гидрогеодинамический предвестник – синхронные понижения уровней воды в обеих скважинах с амплитудами 11 и 1 см, вызванные объемной деформацией расширения с амплитудой порядка 1×10^{-7} .

ВВЕДЕНИЕ

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из эффективных способов геофизического мониторинга, направленного на поиск предвестников сильных землетрясений. Это связано с тем, что уровни воды могут откликаться на сеймотектонические изменения напряженно-деформированного состояния среды (НДСС), сопровождающиеся деформациями водонасыщенных пород, развитием в них трещинообразования и дилатансии, изменениями порового давления (Roeloffs, 1988). Вместе с тем, выделение сеймотектонических сигналов из вариаций уровней воды представляет непростую задачу. Объективными причинами этого являются неопределенность частотного диапазона и амплитуд изменений НДСС на стадиях подготовки землетрясений, а

также многообразие условий и особенностей формирования гидрогеодинамического режима конкретных наблюдательных систем “скважина – резервуар”.

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 сильных землетрясений, вызывающих вынужденные и свободные колебания уровней воды; его дальное действие может составлять до тысяч километров (Cooper et al., 1965). Динамическое воздействие сейсмических сотрясений на подземные воды может также

сопровождаться разнообразными изменениями в режиме источников и скважин вследствие локального изменения проницаемости водонасыщенных пород.

2. *Статическое воздействие* связано с изменением статического напряженного состояния резервуаров подземных вод при образовании разрывов в очагах землетрясений. При этом распределение зон косейсмического сжатия и расширения определяется, в основном, механизмом очага землетрясения (Wakita, 1975). Этот эффект может проявляться в напорных подземных водах на расстояниях не более первых сотен километров от эпицентральной области.

3. Третий механизм связан с деформациями водовмещающих пород, вызванных *процессами подготовки сильных землетрясений*. На стадии подготовки землетрясения может развиваться дилатансия водовмещающих пород, изменение структуры порового пространства и фильтрационных связей, нарушение фазового равновесия в подземных водах (Копылова, 2001; Roeloffs, 1988; King et al., 2000). Эти процессы также могут проявляться в изменениях уровней воды в скважинах.

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 процесс водного питания подземных резервуаров слабо и в сглаженном виде воздействует на величину напора, поэтому может наблюдаться статически изолированный отклик уровней воды на земные приливы, вариации атмосферного давления и сейсмотектоническую деформацию в широком частотном диапазоне.

Условиями эффективного мониторинга НДСС по уровнемерным данным 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 уровней воды естественных факторов-помех – атмосферного давления, земных и морских приливов, осадков и процессов водного питания резервуаров подземных вод;

3 – оценка деформометрических свойств наблюдательных систем «скважина-резервуар»

с определением частотного диапазона проявления неискаженного статически изолированного отклика и величины деформометрической чувствительности уровней воды.

В 1997-2004 гг. на скважинах Е1 и ЮЗ-5 Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН проводились наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. В статье дается описание системы наблюдений и представляется методика обработки данных, направленная на выделение аномальных вариаций уровней воды и количественную оценку сейсмотектонической деформации. Рассматриваются различные типы эффектов в изменениях уровней воды в результате сейсмического воздействия. Основное внимание уделяется результатам наблюдений на скважине ЮЗ-5, полученным в последние годы. Выявленные закономерности в изменениях уровня воды в скв. Е1 под влиянием землетрясений представлены в ряде публикаций (Копылова, 2001; Копылова и др., 2000). В настоящей работе эти данные приводятся, в основном, для сравнения.

ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИН, СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫХ

В табл. 1 приводится краткая характеристика наблюдательных скважин ЮЗ-5 и Е1 (Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2004).

Наблюдательная скважина ЮЗ-5 вскрывает в интервале глубин 0-270 м толщу рыхлых четвертичных отложений, к которой приурочен грунтовый водоносный горизонт. В интервале 270-800 м распространены верхнемеловые породы, представленные чередованием слоев туфоалевролитов и филлитовидных сланцев. В верхнемеловых породах распространены напорные подземные воды. Ствол скважины обсажен металлической колонной до глубины 310 м; в интервале 310-800 м ствол скважины открыт и связан с резервуаром напорных подземных вод в меловых отложениях. Уровень воды установился 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 усло-

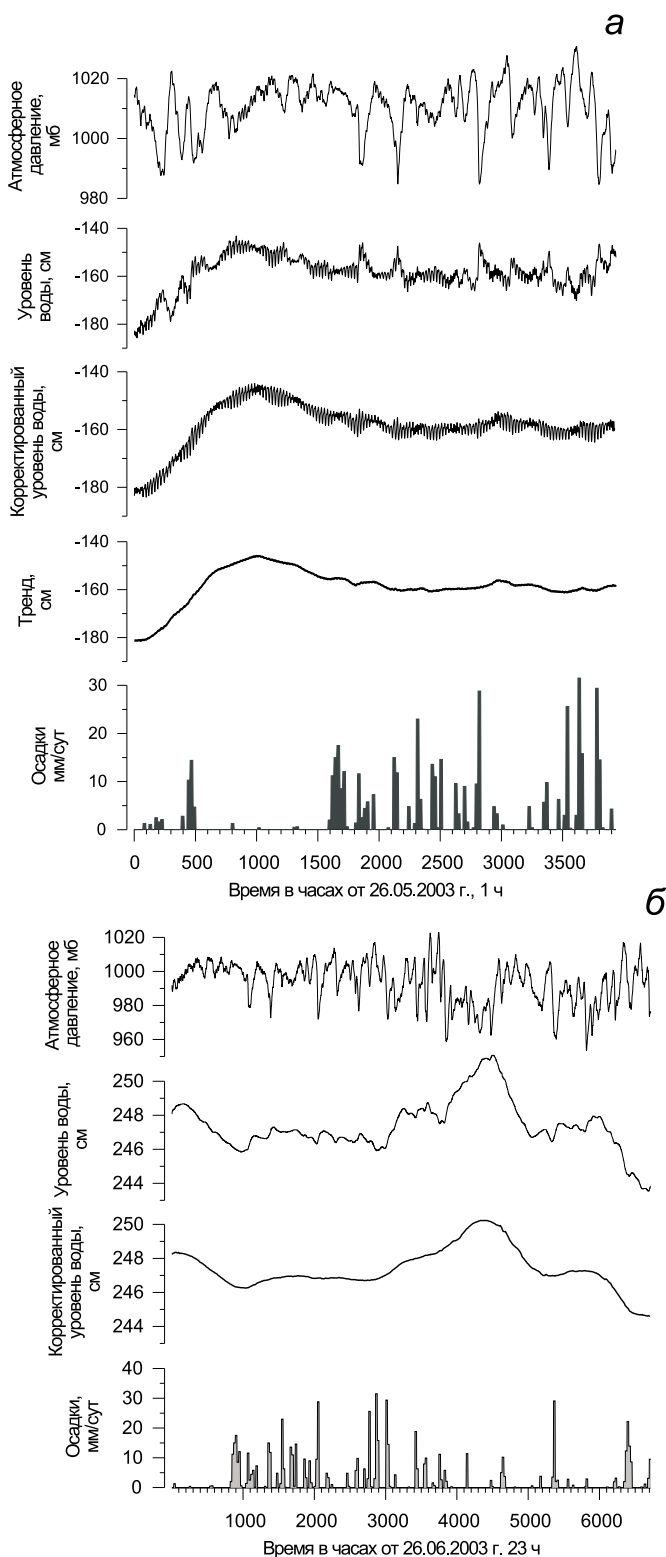


Рис. 1. Графики изменений уровней воды в скважине ЮЗ-5 с 26 мая по 5 ноября 2003 г. (а) и в скважине Е1 с 26 июня 2003 г. по 1 апреля 2004 г. (б) в сопоставлении с атмосферным давлением и осадками (по данным метеостанции Пионерская). Приводятся также изменения уровней воды с компенсированными барометрическими и приливными вариациями.

уровня воды в скв. ЮЗ-5 выделяются тренд с характерным периодом 1 год и приливные вариации с суточными амплитудами 2–8 см (рис. 1 а).

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка данных уровнемерных наблюдений направлена, в первую очередь, на анализ, учет и компенсацию влияния естественных факторов на изменения уровней воды - атмосферного давления, земных и морских приливов, осадков, эффектов питания подземных вод (Копылова, Бормотов, 2004), а также на оценку деформометрических свойств наблюдательных систем «скважина-резервуар» и параметров неискаженного статически изолированного отклика. Деформометрическая чувствительность вариаций уровня воды оценивается на основе приливного анализа (Roeloffs, 1988; Копылова, Болдина, 2004). Приливной анализ данных уровнемерных наблюдений на скв. ЮЗ-5 проводился по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994), которая позволяет получить параметры приливного отклика уровня воды - амплитуды, амплитудные факторы (эквивалентные величине деформометрической чувствительности), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и фазой приливного потенциала для отдельных волн. В рамках программы ETERNA 3.0 также производится компенсация приливных и высокочастотных составляющих барометрического отклика в изменениях уровня воды и получение остатка, обусловленного, в основном, шумовыми факторами и влиянием океанического прилива. Суточные амплитуды высокочастотного остатка в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 составляют 0.1–0.2 см/сутки и увеличиваются до 0.4–0.8 см/сутки при выпадении обильных осадков.

Стандартная обработка данных уровнемерных наблюдений проводилась в рамках программы Diagnoz, разработанной в КФ ГС РАН (Балеста и др., 1999; Копылова и др., 2003). Компенсация барометрических вариаций уровней воды (рис. 1) осуществлялась по интегрированному в Diagnoz алгоритму оценки комплексной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скользящем временном окне (Любушин, 1993).

Тrend and tidal variations of water level in well ЮЗ-5 are characterized by a period of 1 year and tidal variations with daily amplitudes of 2–8 cm (Fig. 1 a).

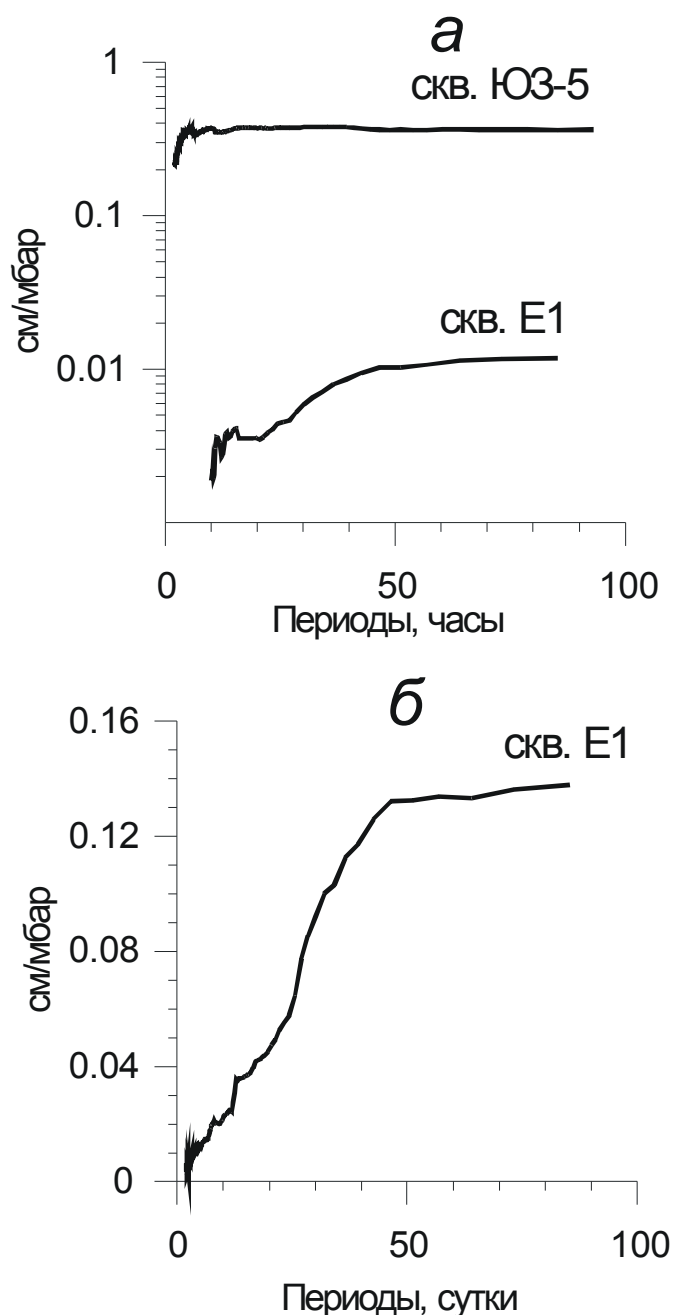


Рис. 2. Амплитудные частотные передаточные функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды: *а* – в диапазоне часовых вариаций для скважин ЮЗ-5 и E1; *б* – в диапазоне суточных вариаций для скважины E1.

приливного откликов уровня воды. Исследование барометрических вариаций уровня воды позволяет оценить частотный диапазон проявления неискаженного статически изолированного отклика, в котором система «скважина – резервуар» будет вести себя подобно деформографу (Rojstaczer, 1988). Для этого методом кросс-спектрального анализа строится амплитудная частотная передаточная функция

от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды. Использование данных по изменениям уровня воды и атмосферного давления в эквивалентных величинах (1мбар = 1гПа=1 см водяного столба) позволяет интерпретировать амплитудную частотную передаточную функцию как зависимость барометрической эффективности E_b от частоты (рис. 2).

Для скважины ЮЗ-5 наблюдается увеличение E_b в диапазоне периодов от 2 до 6 часов от 0.2 до 0.37 см/мбар. На периоде 6 часов достигается максимальная величина $E_b=0.37$ см/мбар, которая остается постоянной на периодах до первых десятков суток. Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления составляет $180^\circ \pm 10^\circ$ во всем рассматриваемом диапазоне периодов. Это указывает на хорошую изоляцию контролируемого резервуара перекрывающей толщей пород и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод. Рост величины на периодах 2-6 часов обусловлен инерционными эффектами водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод.

Результаты кросс-спектрального анализа позволяют сделать 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-первые десятки суток скважина будет работать как деформограф без существенных искажений.

Наличие приливных вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис. 1 *а*) позволяет получить количественную характеристику ее деформометрической чувствительности в диапазоне проявления статически изолированного отклика. В изменениях уровня воды выделены приливные волны $Q_1, O_1, M_1, J_1, OO_1, 2N_2, N_2, M_2, L_2, S_2K_2$ (табл. 2). Величины приливной деформометрической чувствительности для отдельных волн изменяются от 0.09 до 0.15 см/10⁻⁹.

На рис. 3 приводится соотношение между амплитудами приливных волн в изменениях уровня воды и теоретическими амплитудами деформации по модели приливного потенциала CTED (Wenzel, 1994). Наблюдается линейная связь между этими величинами при значении коэффициента детерминации $R^2=0.97$. Наклон линейной зависимости амплитуд приливных изменений уровня воды от соответствующих величин деформации составляет ≈ 0.1 см/10⁻⁹. Эта величина представляется наиболее прием-

Таблица 2. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине Ю35 по программе ETERNA 3.0

Волна	Амплитуда, ед. $\times 10^{-9}$ объемной деформации (нанострейны)	Амплитуда уровня воды, см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град
Q ₁	2.10	0.28	55.2	0.132 \pm 0.002	152.99 1.04
O ₁	10.97	1.32	262.5	0.120 \pm 0.0005	153.28 \pm 0.22
M ₁	0.86	0.10	20.6	0.120 \pm 0.006	157.43 \pm 2.79
P ₁ S ₁	15.43	1.14	226.3	0.074 \pm 0.0003	156.02 \pm 0.25
J ₁	0.86	0.096	19.2	0.112 \pm 0.006	168.32 \pm 2.99
OO ₁	0.47	0.053	10.6	0.113 \pm 0.011	172.44 \pm 5.39
2N ₂	0.31	0.047	107.0	0.150 \pm 0.007	161.81 \pm 2.58
N ₂	1.95	0.23	29.9	0.116 \pm 0.001	151.02 0.54
M ₂	10.18	0.92	434.0	0.090 \pm 0.0002	161.07 \pm 0.13
L ₂	0.29	0.027	12.9	0.094 \pm 0.007	172.43 \pm 4.45
S ₂ K ₂	4.74	0.50	293.0	0.107 \pm 0.0004	172.95 \pm 0.24
M ₃	0.04	0.010	9.1	0.222 \pm 0.024	-166.98 \pm 6.29

лемой в качестве характеристики деформометрической чувствительности уровня воды в скв. Ю3-5 во всем диапазоне приливных периодов (Копылова, Болдина, 2004).

Точность регистрации вариаций уровня воды в скв. Ю3-5 составляет 0.2-0.1 см, поэтому можно ожидать заметные изменения уровня воды при деформации вскрытого резервуара не менее первых единиц 10^{-9} .

Меньшие величины барометрической эффективности и ее медленный рост с увеличе-

нием периодов отмечается для скважины Е1 (рис. 2). В часовом диапазоне наблюдается медленное увеличение барометрического отклика с достижением величины $E_b = 0.011$ см/мбар на периодах 45-50 часов. При этом разность фаз между изменениями уровня воды и атмосферного давления составляет 106-109°. Это указывает на значительную инерционность водообмена между скважиной и резервуаром в диапазоне периодов от часов до первых суток (Копылова, 2001). Рост величины продолжается в диапазоне суточных вариаций при максимальном значении 0.135 см/мбар на периодах 45 - 100 суток (рис. 2 б). Разность фаз в суточном диапазоне возрастает до 130-166°. Это показывает, что влияние инерционных эффектов прослеживается и в суточном диапазоне вариаций уровня воды. В этом заключается существенное отличие формирования барометрического отклика скв. Е1, по сравнению со скважиной Ю3-5, для которой величина E_b остается постоянной как в часовом, так и в суточном диапазоне вариаций. Главной причиной отсутствия

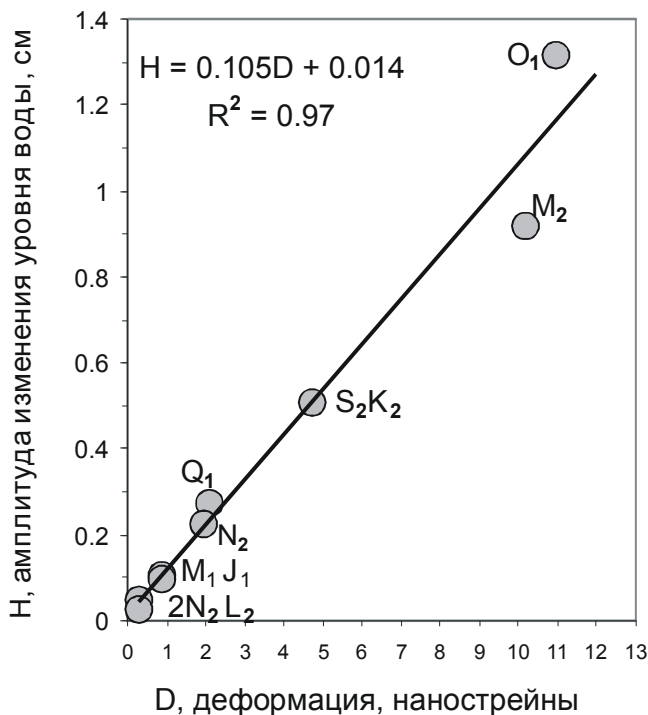


Рис. 3. Зависимость приливных амплитуд в изменениях уровня воды в скважине Ю3-5 от величин теоретической приливной деформации. Q₁, O₁, M₁, J₁, OO₁ – группа суточных приливных волн; 2N₂, N₂, M₂, L₂, S₂K₂ – группа полусуточных приливных волн (табл. 2); R² – величина достоверности аппроксимации линейной зависимости приливных амплитуд в изменениях уровня воды (H) от величин теоретической деформации (D).

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

приливного отклика и роста барометрической эффективности с увеличением периодов вариаций является присутствию газа в составе порового флюида, повышающего сжимаемость флюида и понижающего способность уровня воды откликаться на слабые высокочастотные возмущения напряженно-деформированного состояния резервуара (Копылова, 2001).

Отсутствие приливного отклика и присутствие газа в составе порового флюида приводит к существенному нарушению пороупругого поведения системы «скважина – резервуар» в случае скважины Е1. Поэтому оценка ее деформометрической чувствительности по результатам приливного анализа невозможна. Вместе с тем, такие особенности скважины не исключают проявление своеобразных эффектов сейсмичности в изменениях уровня воды при деформировании водовмещающих пород, развитии в них трещиноватости, изменений фильтрационных связей и фазового состояния порового флюида.

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ ЮЗ-5 И Е1 ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В изменениях уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 обнаружены вариации в связи с рядом землетрясений. При этом их характер существенно отличается для двух скважин. Это обусловлено различием комплекса гидрогеологических, гидрогеодинамических и гидрогеохимических факторов, обеспечивающих

особенности отклика уровня воды на сейсмические воздействия.

№ 1 – ДЦ-5. В изменениях уровня воды скв. ЮЗ-5 обнаружены вариации в связи с девятью землетрясениями (табл. 3), которые разделены на четыре типа. Три типа вариаций соответствуют известным механизмами сейсмического воздействия (типы 2–4). Дополнительно выделен тип вариаций уровня воды после сильнейшего за время наблюдений Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. (тип 1).

Тип 1 – длительные изменения. После Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. уровень воды понижался в течение 3.5 месяцев с амплитудой около 1 м. Затем в течение двух лет наблюдалось его возвращение к прежнему положению (рис. 4). 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: 25.09.03 г., $M=8.3$, $R=1670$ км, о. Хоккайдо; 26.12.2004 г., $M=9$, $R=8250$ км (рис. 5) и 28.03.05 г., $M=8.7$, $R=8200$ км, о. Суматра, обнаружены колебания 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. Такие колебания уровня воды в скв. ЮЗ-5 не проявляются при возникновении местных землетрясений и возникают только при очень сильных и удаленных землетрясениях ($M=8.3-9.0$, $R=1670-8250$

Таблица 3. Землетрясения, вызвавшие изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 за период с сентября 1997 г. по март 2005 г.

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.					
971205	54.64	162.55	10	7.9	7.8	316	T4, T3, T1
980601	52.81	160.37	31	6.6	6.9	140	T3
990308	51.91	159.77	7	7.1	7.0	164	T3
001220	53.31	160.06	65	4.6	-	128	T3
030616	55.30	160.34	190	6.2	6.9	328	T3
030925	41.78	143.91	27	-	8.3	1667	T2
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

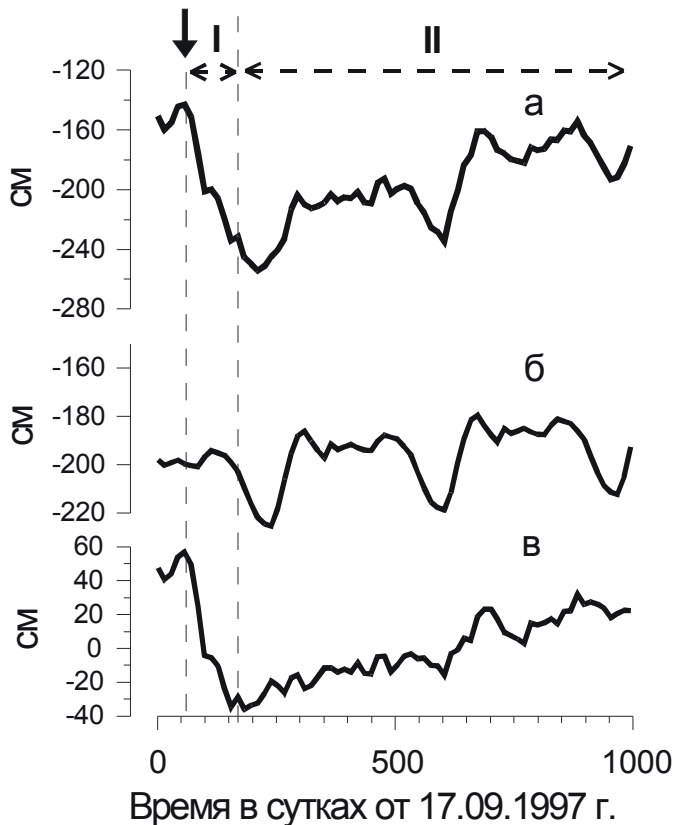


Рис. 4. Долговременные изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=7.9$, $R=316$ км (показано стрелкой): *а* – изменения уровня воды по данным регистрации; *б* – выделенные годовая сезонность и линейный тренд; *в* – остатки в изменениях уровня воды после удаления годовой сезонности и тренда. I – фаза понижения уровня воды, II – фаза восстановления уровня воды.

км), которые генерируют поверхностные волны с периодами не менее 45 с и вызывают резонансный эффект в системе «скважина - резервуар». Изучение таких вариаций уровня воды позволяет уточнять параметры резервуара, в частности, его водопроницаемость (Соорет et al., 1965).

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. 6). 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 деформметрической чувствительности ($2.4 - 86 \times 10^{-9}$) и характер деформации резервуара по направлению изменения уровня воды. Понижение уровня воды

фиксирует деформацию расширения резервуара, повышение уровня воды – его 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. По времени понижение уровней воды примерно совпадает с предсейсмическим перемещением GPS-станций Камчатской сети (рис. 7), представляющим проявление деформационного предвестника этого землетрясения (Gordeev et al., 2001). 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 1.1×10^{-7} .

№ 4 – А1. В изменениях уровня в скв. Е1 выявлены вариации, сопутствующие (постсейсмические) и предшествующие (предсейсмические) только местным землетрясениям с магнитудами не менее 5.5, удаленным на расстояние до 370 км. Зависимость $K \geq 3.39 \lg R + 6.22$ ($M \geq 2.51 \lg R + 0.6$) определяет параметры землетрясений (K – энергетический класс, равный логарифму энергии землетрясения в Дж; R – гипоцентрально расстояние, км; M – магнитуда), вызывающих изменения уровня воды в скв. Е1 (Копылова, 2001).

Постсейсмические вариации проявляются в плавных повышениях уровня воды с достижением максимальных амплитуд 3.7 – 30 см в течение 9–90 суток после землетрясений. После достижения максимальных величин происходит возвращение уровня воды к его фоновому положению. Такие повышения уровня воды вызываются увеличением напора в системе «скважина – резервуар» при динамическом воздействии сейсмических волн от местных землетрясений. В качестве наиболее вероятного механизма увеличения напора рассматривается переход растворенного газа в свободное состояние при сейсмических сотрясениях (Копылова, 2001).

Предсейсмические вариации выражаются в понижениях уровня воды со скоростью не менее 0.6–0.7 мм/сутки в течение недель – первых месяцев до землетрясения. В 1987–1998 гг. продолжительность таких понижений уровня воды изменялась от 3 недель до 7 месяцев при средней величине 3.4 месяца. Природа формирования таких аномалий не совсем ясна. Очевидно, что

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

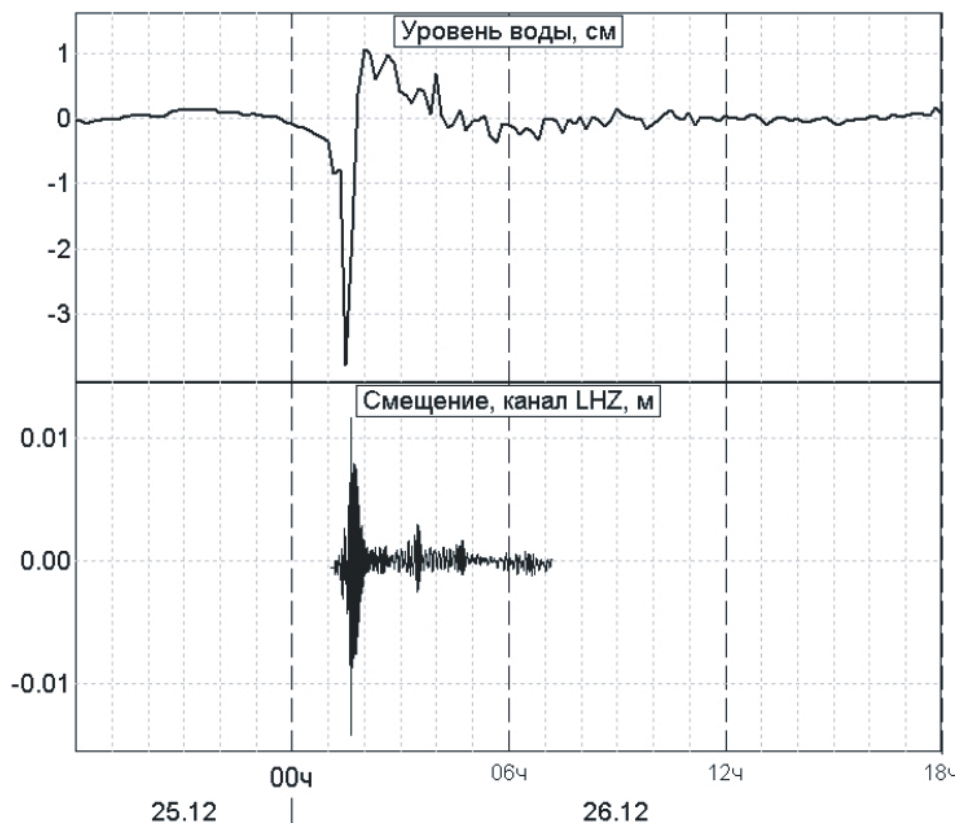
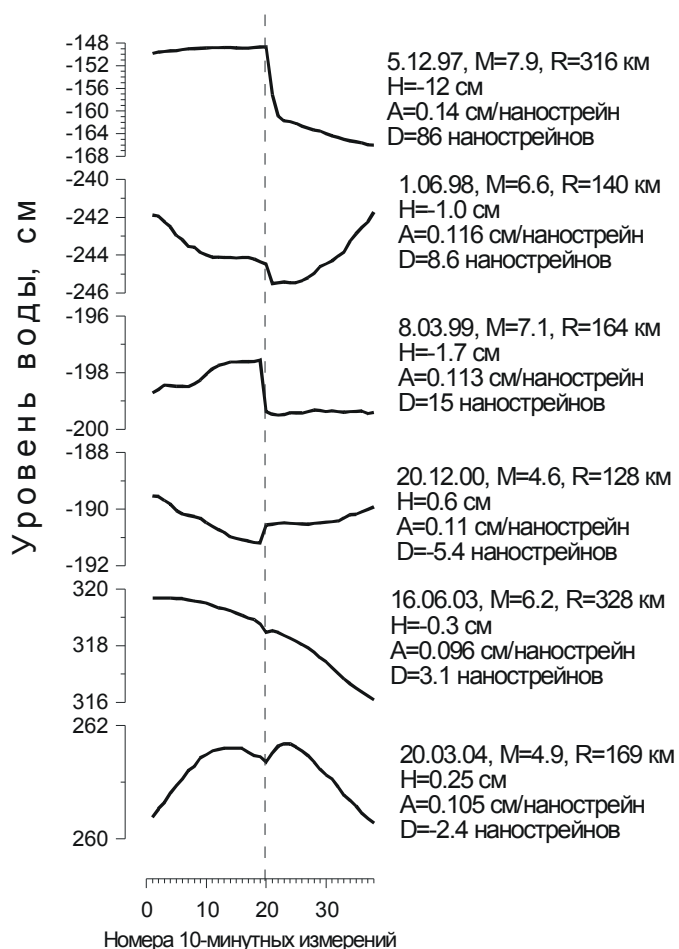


Рис. 5. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время Су-матранского землетрясения 26.12.2004 г., $M_w=9$, в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск.



понижения уровня воды происходят из-за уменьшения напора в системе «скважина - резервуар». Это может происходить либо при увеличении порового пространства за счет развития трещиноватости водовмещающих пород, либо за счет увеличения плотности порового флюида, например, при ослаблении процесса газогенерации и уменьшении концентрации газа, а также при переходе свободного газа в растворенное состояние. Ясно лишь то, что подготовка сильных землетрясений Камчатки сопровождается в течение недель – месяцев гидрогеомеханическим процессом, приводящим к преимущественному уменьшению напора в резервуаре, вскрытом скважиной Е1.

Статистическая оценка прогнозного признака. При прогнозе землетрясений с $M \geq 6.6$ на временном интервале 3 недели ретроспективная прогностическая эффективность признака “скорость понижения уровня воды не менее 0.7 мм/сутки” для периода наблюдений 1987-1998

Рис. 6. Косейсмические скачки в изменении уровня воды в скважине ЮЗ-5 в моменты шести землетрясений (табл. 3, тип 3 (ТЗ)). H - амплитуда изменения уровня воды, A - приливная деформометрическая чувствительность, D - косейсмическая деформация: «+» - расширение, «-» - сжатие.

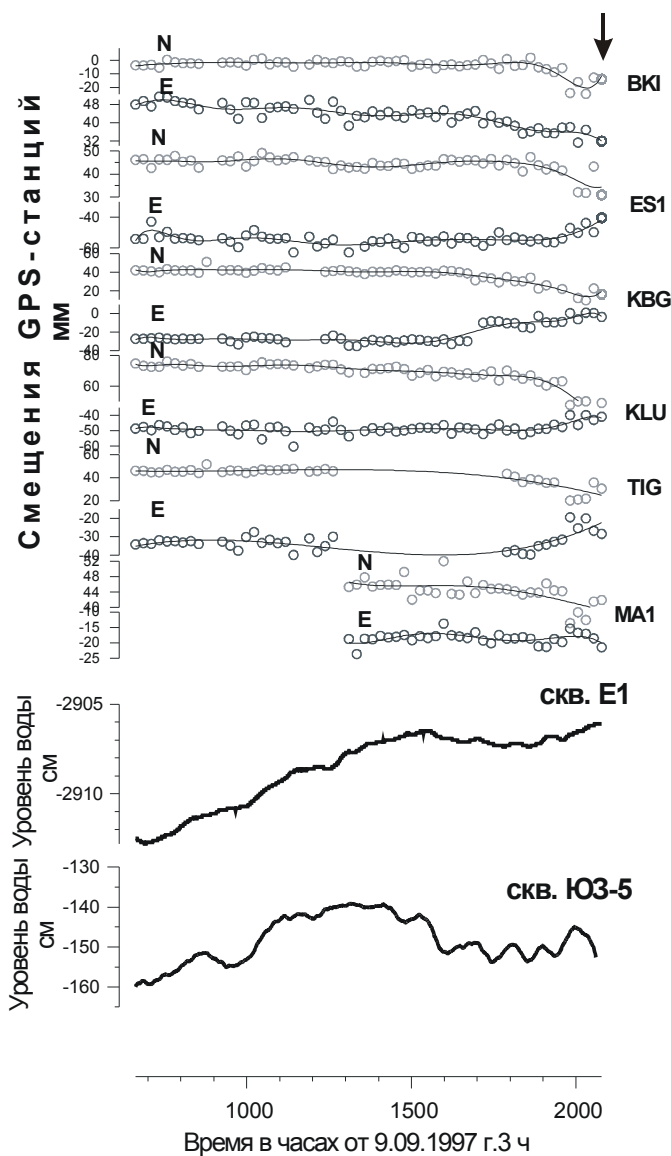


Рис. 7. Изменения уровней воды в скважинах E1, Ю3-5 и смещения GPS-станций на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.97 г., $M=7.9$ (показано стрелкой): N – смещение в направлении Ю-С, E – смещение в направлении З-В. VKI, ES1, KVG, KLU, TIG, MA1 – GPS-станции Камчатской сети по (Gordeev et al., 2001).

гг. составляет 2.7, а вероятность связи прогнозного признака и землетрясений 0.8 (Копылова, 2001).

По данным наблюдений в 2004 г. перед всеми из четырех произошедших землетрясений с $M=5.5-6.9$ на гипоцентральных расстояниях 140-350 км наблюдалось понижение уровня воды в скв. E1 со скоростью не менее 0.7 мм/сут. Время от начала аномалий до возникновения землетрясений составляло 10-49 суток при средней величине 26 сут. Вероятность связи прогнозного признака по уровнемерным дан-

ным и произошедших землетрясений $p=4/4=1$. Отношение суммарного времени проявления тревожного признака ко всему времени наблюдений составляет $\tau=132 \text{ сут}/366 \text{ сут}=0.36$. Сейсмопрогностическая эффективность для прогноза землетрясений с $M \geq 5.5$ на гипоцентральных расстояниях до 350 км по данным наблюдений 2004 года равна $I=p/\tau=1/0.36=2.8$ и примерно соответствует оценкам по данным наблюдений 1987-1998 гг. Следует отметить, что перед тремя землетрясениями подавались сообщения в Камчатское отделение Федерального центра по прогнозу землетрясений о повышенной сейсмической опасности по данным наблюдений на скв. E1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различие в проявлении гидрогеодинамических предвестников. Результаты наблюдений на двух скважинах показывают существенное различие в поведении двух наблюдательных систем «скважина – резервуар» под влиянием землетрясений. Для скважины Ю3-5 установлен статически изолированный пороупругий отклик уровня воды в диапазоне периодов от часов до первых десятков суток. В этом диапазоне вариации уровня воды прямо отражают изменения порового давления при вариациях НДСС, вызывающих объемные деформации не менее 10^{-9} . Наличие статически изолированного отклика позволяет оценивать косейсмическую и предсейсмическую деформацию по величине приливной деформометрической чувствительности $0.1 \text{ см}/10^{-9}$ при изменениях уровня воды, соответствующих типам 3 и 4.

Гидрогеодинамический предвестник в изменениях уровня воды в скв. Ю3-5 проявился лишь один раз перед сильнейшим Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г. Его продолжительность составляла три недели. Предвестниковые признаки в виде увеличения скорости понижения уровня воды в скв. E1 в течение недель – месяцев проявляются регулярно перед менее значительными сейсмическими событиями с $M \geq 5.5$. При этом амплитуда гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. E1 перед Кроноцким землетрясением (1 см) меньше, чем амплитуды проявлений тревожных признаков перед менее сильными землетрясениями. По-видимому, в случае скв. E1, чувствительность системы «скважина – резервуар» определяется не пороупругой

реакцией уровня воды на изменения НДСС, как в случае скважины ЮЗ-5, а более низко-частотным гидрогеомеханическим процессом с характерным периодом десятки суток - месяцы, приводящим к преимущественному понижению напора.

Можно сделать предположение о том, что резервуары напорных подземных вод на территории Восточной Камчатки постоянно подвержены слабым гидрогеомеханическим изменениям напряженного состояния. В определенных ситуациях, сопряженных с подготовкой местных землетрясений с M не менее 5.5, уровень напряженного состояния подземных резервуаров повышается. Но отражение такого гидрогеомеханического процесса может проявляться в изменениях уровней воды только в условиях динамических систем «порода-вода-газ». Примерами таких систем является не только скважина Е1, но и Пиначевская скважина ГК1, в изменениях химического состава воды которой проявляются предвестниковые аномалии продолжительностью в несколько месяцев, в отдельных случаях синхронные с аномальными понижениями уровня воды в скв. Е1 и вариациями слабой сейсмичности (Копылова, 2001; Копылова, Серафимова, 2004).

Оценка деформометрической чувствительности скважины Е1. Синхронное проявление гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды в обеих скважинах (рис. 7) позволяет предположить, что в этом случае наблюдалась пороупругая реакция на сеймотектоническую деформацию не только уровня воды в скв. ЮЗ-5, но также и преимущественно пороупругая реакция уровня воды в скв. Е1. Отсюда можно оценить деформометрическую чувствительность этой скважины, если предположить, что уровень деформации пород в обоих резервуарах на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения был примерно одинаковым и равным 1×10^{-7} . При таких предположениях, деформометрическая чувствительность уровня воды в скважине Е1 составляет примерно $0.1 \text{ см}/10^{-8}$, т. е. на порядок меньше, чем для вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5. Пороупругая реакция в изменениях уровня воды в скв. Е1, по-видимому, может проявляться при величине сеймотектонической деформации не менее 10^{-7} на периодах не менее двух суток. На меньших периодах пороупругая реакция уровня воды может существенно ослабляться за счет инерционных эффектов

водообмена в скв. Е1. Об этом свидетельствует слабое проявление барометрического отклика на периодах менее 45-50 часов (рис. 2 а) и отсутствие косейсмического скачка в изменениях уровня воды при Кроноцком землетрясении.

О механизме длительного изменения уровня воды в скв. ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения. Понижение уровня воды в течение 3.5 месяцев с амплитудой около одного метра после Кроноцкого землетрясения и его последующее двухлетнее восстановление (тип 1, рис. 4) 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 0.86×10^{-7} . Понижение уровня воды также могло быть вызвано увеличением проницаемости водовмещающих пород резервуара при сейсмических сотрясениях 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.

О бухтообразной природе гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Изменение уровней воды на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения имеет традиционный для гидрогеодинамических предвестников «бухтообразный» характер. В соответствии с наиболее известными моделями подготовки землетрясений дилатансии — диффузии (ДД-модель) и

лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ-модель) «бухтообразный» характер изменений уровней воды объясняется развитием трещиноватости (Соболев, 1993). Начальное понижение уровня воды связывается с раскрытием трещин, их заполнением водой и понижением порового давления. Последующая стабилизация уровня воды и его возвращение к первоначальному положению объясняется упрочнением среды и закрытием большей части новообразованных трещин на стадии, непосредственно предшествующей образованию магистрального разрыва.

Такое объяснение «бухтообразного» проявления гидрогеодинамических предвестников представляется не вполне убедительным, так как не учитывает реальные условия формирования напора в природных резервуарах подземных вод.

Наиболее амплитудные годовые и многолетние изменения уровней воды в скважинах обусловлены водным питанием и разгрузкой подземных вод. Эти процессы обеспечивают квазистационарный гидрогеодинамический режим подземных вод с характерным годовым циклом и по мощности значительно превосходят сеймотектоническое воздействие. В фазе водного питания происходит повышение напора в резервуарах подземных вод, и уровни воды в скважинах повышаются. Если в это время накладывается сеймотектоническая деформация и трещинообразование в водонасыщенных породах, то на фоне восходящего тренда уровня воды будет образовываться «бухта»: сначала заметное замедление восходящего тренда, затем меньшее и меньшее его замедление, связанное с влиянием более мощного процесса повышения напора. При сработке водных запасов в резервуаре, т. е. при понижении напора, сеймотектоническое деформирование и трещинообразование накладывается на нисходящий тренд уровня воды, сначала в виде заметного увеличения скорости понижения уровня воды, затем в виде менее и менее заметного понижения из-за воздействия доминирующего процесса сработки водных запасов. Визуально в обоих случаях проявляются «бухты» в изменениях уровня воды. Отсюда следует, что водоносная система, находящаяся в квазистационарном гидрогеодинамическом состоянии, порождает внутренние процессы, направленные на подавление возмущающих сеймотектонических воздействий.

В системе «скважина-резервуар» квазистационарные гидрогеодинамические условия задаются величиной напора, и любое отклонение в состоянии системы (например, вследствие развития трещинообразования и временного изменения фильтрационных связей) в конечном итоге будет компенсироваться внутренними процессами самоорганизации, направленными на возвращение системы в прежнее состояние. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо выделить процесс (или процессы), обеспечивающий(ие) квазистационарный гидрогеодинамический режим в системе «скважина - резервуар», а также процессы, выводящие систему из равновесия и являющиеся временными, преходящими. Очевидно, что время проявления внешнего возмущения (в данном случае, предсейсмической деформации в виде бухтообразного изменения уровня воды) зависит от его интенсивности, а также от инерционности системы «скважина – резервуар». Если для скважины ЮЗ-5 определяющим в ее гидрогеодинамическом состоянии является величина напора, которая задается постоянством областей питания и разгрузки, то для скважины Е1, а также для Пиначевских источников, скважины ГК-1 и других систем с присутствием газа в поровом пространстве, их гидрогеодинамическое состояние определяется не только величиной напора, но и процессом газогенерации и ее изменчивостью во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная выше характеристика эффектов сейсмичности в изменениях уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 дает основание рассматривать наблюдательные системы «скважина – резервуар подземных вод» в качестве своеобразных индикаторов изменения напряженно-деформированного состояния среды при воздействии сеймотектонических процессов. При этом механизмы чувствительности конкретных скважин к изменениям НДСС могут существенно различаться и определяются комплексом гидрогеологических особенностей, в первую очередь, наличием или отсутствием газа в составе подземных вод. В напорных холодных подземных водах может обнаруживаться неискаженный пороупругий отклик уровней воды в достаточно широком частотном диапазоне. В этом случае система «скважина-резервуар» может рассматриваться в качестве пока-

зателя деформации водовмещающих пород с возможностью ее количественной оценки по величине приливной деформометрической чувствительности.

Присутствие газа в подземных водах, с одной стороны, затрудняет проявление статически изолированного отклика за счет повышения сжимаемости порового раствора, с другой стороны, обеспечивает высокую динамичность процессов в системе «водонасыщенная порода – вода – газ» даже при слабых изменениях НДСС, которые могут проявляться в вариациях уровней воды. По данным наблюдений на скважинах Е1 и ГК-1 подготовка сильных землетрясений Камчатки регулярно проявляется в вариациях гидрогеодинамических и гидрогеохимических параметров режима газонасыщенных подземных вод.

Наиболее характерные изменения уровня воды проявились в скв. ЮЗ-5 в связи с подготовкой и реализацией сильнейшего Кроноцкого землетрясения, $M=7.9$, $R=316$ км. В этом случае наблюдалось последовательное проявление 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 водонасыщенных пород при сейсмических сотрясениях.

Список литературы

- 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.
- Балеста С.Т., Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р. и др.* Комплексные геофизические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 90-100.
- 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.
- 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.
- Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Пантюхин Е.А.* Информационная система «Полигон»: комплекс программных средств для сбора, хранения и обработки данных геофизических наблюдений // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Материалы междунар. геофиз. конф. Новосибирск, 23-26 сентября, 2003 г. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2003. С. 393 – 399.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка порупругих параметров резервуаров подземных вод по данным уровнемерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. 2004. С. 405 – 421.
- Копылова Г.Н., Бормотов В.А.* Эффекты сейсмичности в изменениях уровней воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер. Матер. VI междунар. междисциплинар. научн. симпоз. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 134 – 149.
- Копылова Г.Н., Серафимова Ю.К.* Процессы подготовки сильных ($M \geq 6.6$) землетрясений Камчатки 1987-1993 гг. по данным многолетних комплексных наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2004. № 1. С. 55-61.
- Любушин А.А. (мл.)* Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103-108.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- 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.
- 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.
- King C.-Y., Azuma S., Ohno M. et al.* In search of earthquake precursors in water-level data of 16 closely clustered wells at Tono, Japan // Geophys. J. Int. 2000. V. 143. P. 469-477.
- Roeloffs E. A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177-209.
- 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.
- Wakita H.* Water level as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. № 189. P. 553-555.
- Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719-8721.

КОПЫЛОВА

WATER-LEVEL CHANGES IN WELLS DUE TO EARTHQUAKES

G.N. Kopylova

*Kamchatka Branch of Geophysical Service Russian Academy of Science,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006*

In 1997-2005 the digital recording of water level in two wells (E1 and UZ-5, Kamchatka) was conducted by EMSD GS RAS for the purposes of seismic monitoring and earthquakes precursors searching. The collection system, water-level data processing and revealed water level changes due to earthquakes are described in this paper. There is presentation of the processing technique for quantitative estimation of seismotectonic strain based on the evaluation of static confined water level response and tidal sensitivity of water level changes. The hydrogeodynamic precursor of the 5th December 1997 Kronotskoe earthquake, M=7.9 developed in both wells during three weeks in the form of synchronous water-level decreases with amplitudes 11 cm and 1 cm, due to extension with the amount about 1×10^{-7} .