

УДК 556.33:550.348

## ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА, ВЫЗВАННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

© 2006 г. Г.Н. Копылова

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

Поступила в редакцию 10.08.2005 г.

В течение 1997–2004 гг. Камчатской опытно-методической сейсмологической партией ГС РАН проводилась цифровая регистрация уровня воды и атмосферного давления в скважине ЮЗ-5, Камчатка, с целью мониторинга сеймотектонических процессов и поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. В статье описывается система сбора и обработки данных уровнемерных наблюдений; представлен способ количественной оценки сеймотектонической деформации водовмещающих пород на основе оценки статически изолированного отклика и приливной деформметрической чувствительности вариаций уровня воды. Дается характеристика четырех типов эффектов в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 под влиянием процессов подготовки землетрясений (тип I), изменения статического поля напряжений при образовании разрывов в очагах землетрясений (тип II), а также длительных постсейсмических изменений уровня воды (тип III) и колебаний уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн (тип IV). В течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г.,  $M_W = 7.8$ ,  $R = 316$  км, в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 проявлялся гидрогеодинамический предвестник – бухтообразное понижение уровня воды с амплитудой 11 см, синхронное с понижением уровня воды в скважине Е1 и с предсейсмическими перемещениями GPS-станций на Камчатке. Приводятся оценки величин и характера косейсмической и предсейсмической деформации водонасыщенных пород, вскрытых скважиной ЮЗ-5.

### 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 [13]. 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.

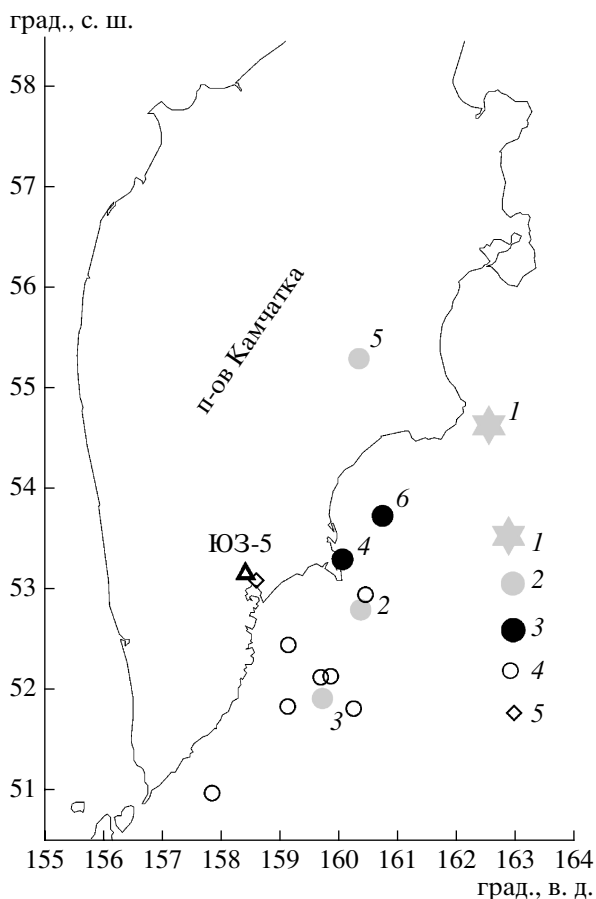
По литературным данным известно не менее трех механизмов воздействия землетрясений на подземные воды.

1. Динамическое воздействие связано с прохождением сейсмических волн, вызывающих импульсы сжатия – расширения водонасыщенных пород и соответствующие изменения уровней во-

ды 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 [10]. 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 [15]. 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 [3, 12, 13]. Эти процессы также



**Рис. 1.** Схема расположения скважины ЮЗ-5 и эпицентров землетрясений: 1 – Кроноцкое землетрясение 5.12.1997 г.,  $M_W = 7.8$ ; 2 – землетрясения, вызвавшие косейсмическое понижение уровня воды; 3 – землетрясения, вызвавшие косейсмическое повышение уровня воды (номера землетрясений соответствуют номерам в таблице 3 и на рис. 2); 4 – землетрясения с  $M = 5.3-5.9$  на гипоцентральной дистанции от скважины  $R = 100-250$  км, произошедшие в периоды детальных наблюдений (табл. 1) и не вызвавшие изменения уровня воды (их относительное воздействие в районе скважины показано на рис. 2); 5 – метеостанция Пионерская.

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 резервуаров подземных вод слабо и в сглаженном виде воздействует на величину гидростатического 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 мин;

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 неискжженного статически изолированного отклика и величины деформометрической чувствительности вариаций уровней воды.

В 1997–2004 гг. на скважине ЮЗ-5 Камчатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН проведены наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений [4]. В статье дается описание системы наблюдений и представляется методика обработки данных, направленная на выделение вариаций уровня воды, вызванных землетрясениями, и на количественную оценку сейсмотектонической деформации. Рассматриваются различные типы эффектов в изменениях уровня воды в результате сейсмического воздействия.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИНЫ, СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ДАННЫХ

Скважина ЮЗ-5 (координаты  $53.17^\circ$  с.ш.,  $158.41^\circ$  в.д., глубина 800 м) пробурена в 1994 г. (рис. 1). Она 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 условиях активного водообмена. Об этом свидетельствуют низкая минерали-

зация (0.22 г/л) и химический состав воды ( $\text{HCO}_3^-$ – $\text{Cl/Na}$ ), пониженные величины температуры воды (22.5°C на глубине 800 м) и геотермического градиента (2°/100 м), а также низкая концентрация кремниевой кислоты ( $\text{H}_4\text{SiO}_4 = 5$  мг/л). Скважина интересна тем, что может быть репрезентативной по отношению к особенностям формирования режима холодных напорных вод под влиянием сейсмотектонических процессов.

С сентября 1997 г. на скважине ЮЗ-5 проводятся автоматизированные наблюдения Камчатской опытно-методической сейсмологической партией ГС РАН за вариациями уровня воды и атмосферного давления с интервалом дискретизации 10 минут. В 1997–2002 гг. для измерений уровня воды и атмосферного давления применялись дифференциальные датчики давления ДУ, ДА с частотным выходом [1] и регистратор ГИП-3 с накоплением данных на твердотельную память. В мае 2003 г. на скважине ЮЗ-5 установлен универсальный регистратор Кедр А2 с накоплением данных на твердотельную память (ООО “Полином”, г. Хабаровск). Регистратор оборудован ультразвуковым датчиком уровня воды и датчиками атмосферного давления и температуры воздуха.

Точность регистрации уровня воды составляет  $\pm 0.2$  см для датчика ДУ и  $\pm 0.1$  см для ультразвукового датчика. В течение всего времени наблюдений проводились ручные замеры уровня воды с частотой 1 раз в 14 сут. Точность ручных измерений составляла  $\pm 0.5$  см.

Из-за технических неполадок в работе аппаратуры данные цифровой регистрации уровня воды с интервалом дискретизации 10 мин представляют восемь фрагментов длиной 3.5 – 12.4 мес, которые составляют около 65% от общего времени наблюдений с 9 сентября 1997 г. по 31 декабря 2004 г. (табл. 1).

Данные по атмосферному давлению, температуре воздуха и по суточным суммам осадков получены с метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю состояния окружающей среды (53° с. ш., 158.6° в. д., рис. 1). Для характеристики сейсмичности использовались данные регионального каталога землетрясений Камчатки, полученного КОМСП ГС РАН, и электронные ресурсы сайта <http://www.iris.washington.edu/>.

На рис. 2 представлены данные уровнемерных наблюдений с сентября 1997 г. по декабрь 2004 г. в сопоставлении с вариациями метеорологических параметров по данным метеостанции Пионерская. Временной ряд вариаций уровня воды построен по данным 10-минутной цифровой регистрации и восполнен в течение технических пропусков по данным 14-суточных ручных измерений. На рис. 3а представлен фрагмент часовых

**Таблица 1.** Характеристика циклов детальных наблюдений на скважине ЮЗ-5, 1997–2004 гг.

Номер цикла	Период наблюдений, ггммдд–ггммдд	Длина ряда, ч/мес.	Способ регистрации уровня воды и атмосферного давления
1	970909–980112	2994/4.1	ДУ, ДА, ГИП-3
2	980319–990112	7160/9.8	
3	990120–990507	2571/3.5	
4	990720–000316	5781/7.9	
5	000420–000920	3694/5.1	
6	001013–010507	4965/6.8	
7	030526–031106	3963/5.4	
8	031219–041231	9072/12.4	

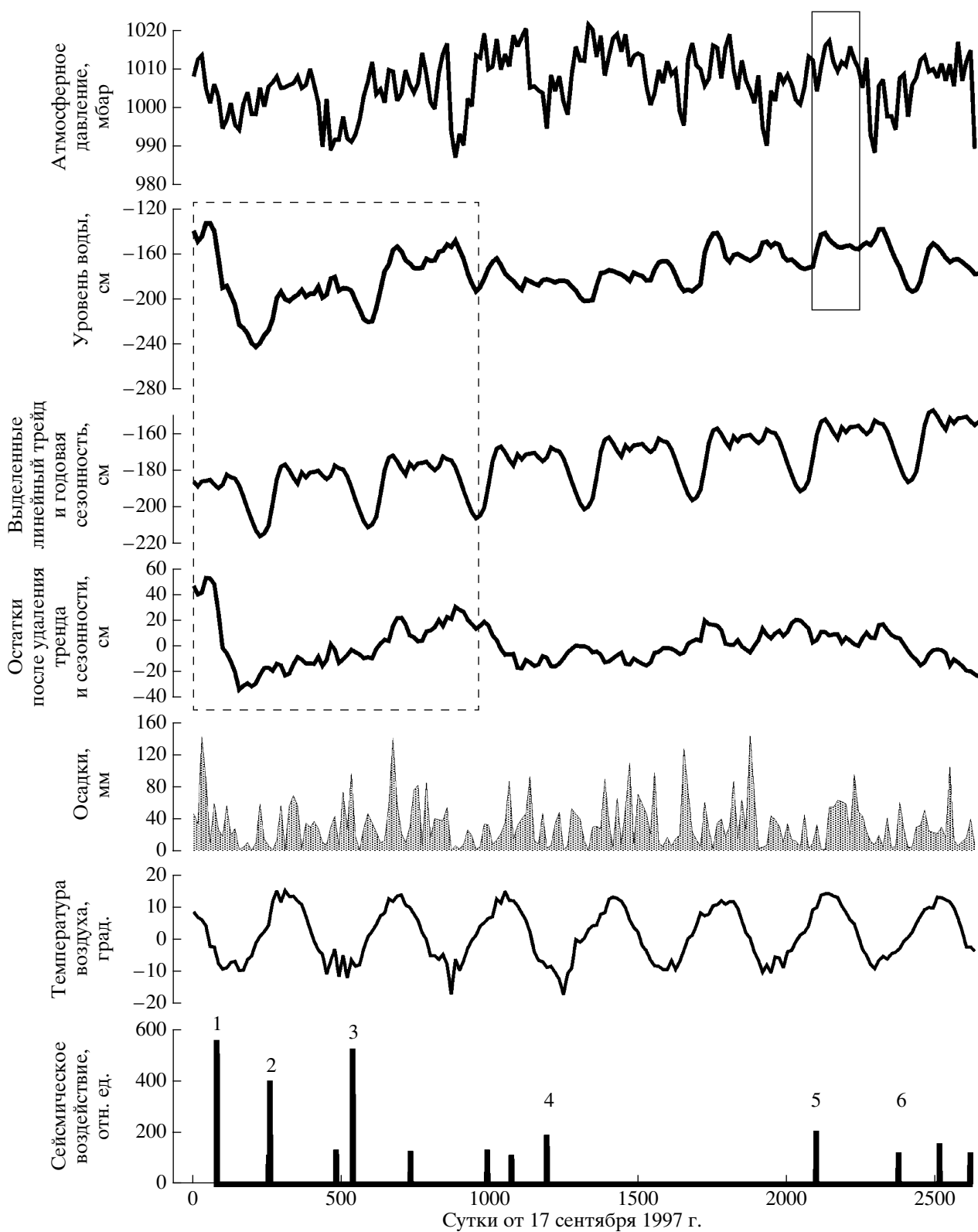
данных регистрации уровня воды для периода с 26 мая по 6 ноября 2003 г. (табл. 1, цикл 7).

В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 обнаруживается влияние естественных факторов-помех: барометрические вариации под воздействием перепадов атмосферного давления, повышения уровня воды с амплитудами 1–2 см при выпадении атмосферных осадков не менее 10–20 мм/сут и приливных вариаций с суточными амплитудами 2–8 см (рис. 3а). В долговременных изменениях уровня воды выделяется тренд с характерным периодом 1 год (рис. 2), обусловленный процессом водного питания и расходования подземных вод.

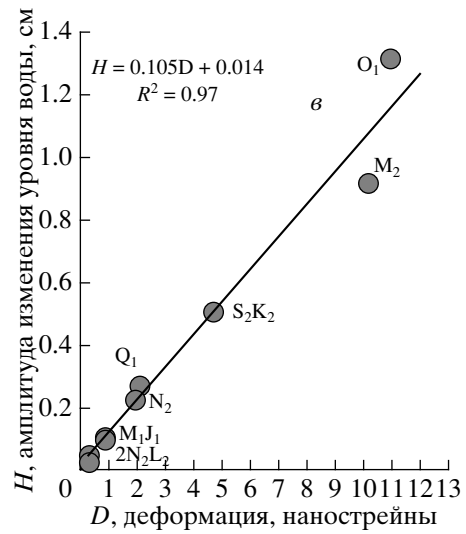
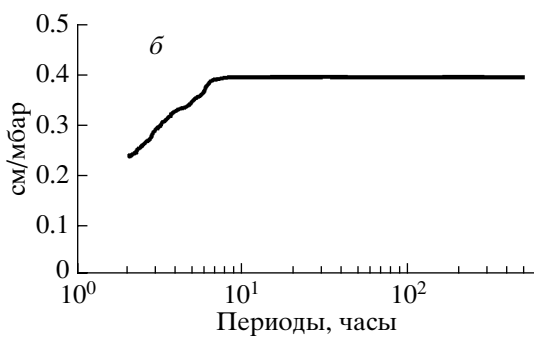
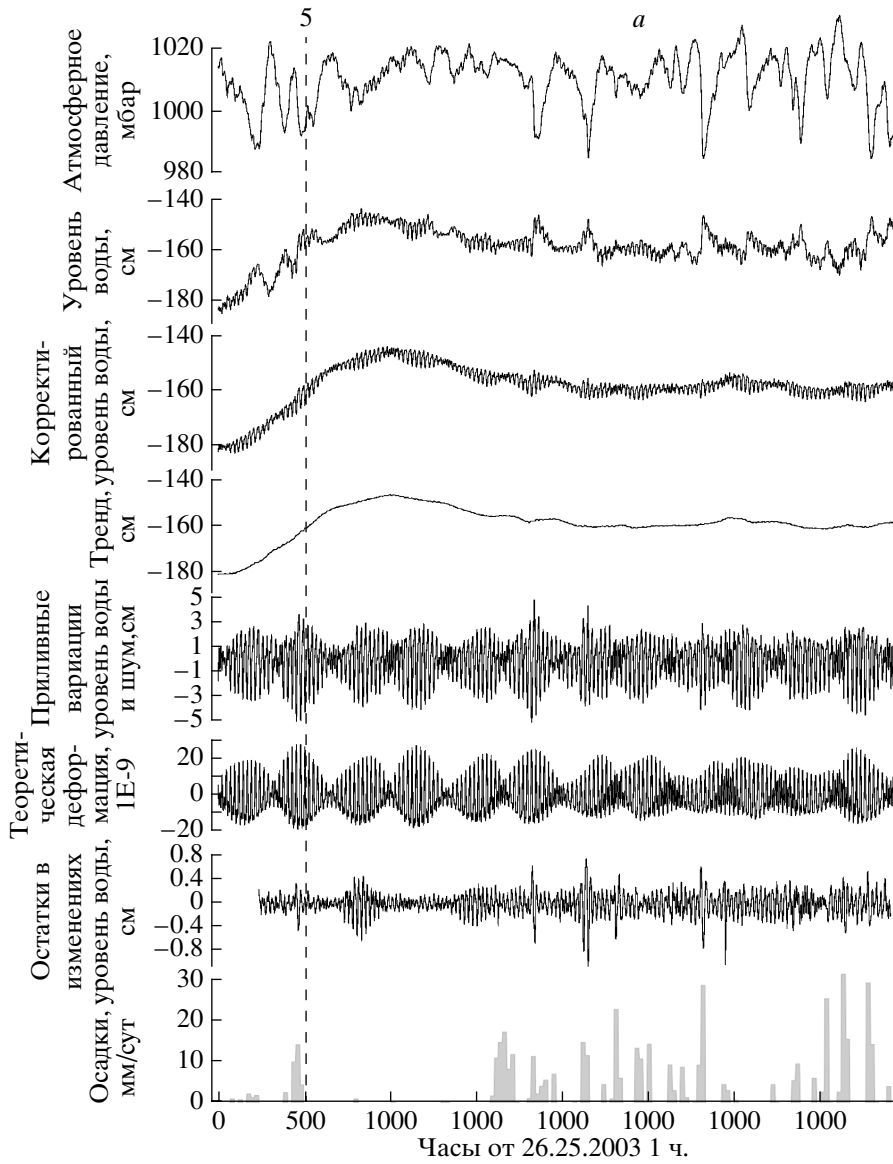
#### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка данных уровнемерных наблюдений включает анализ, учет и компенсацию влияния естественных факторов-помех на изменения уровня воды: атмосферного давления, земных и морских приливов, осадков, эффектов питания подземных вод [6], а также оценку деформометрических свойств наблюдательной системы “скважина-резервуар” и параметров неискаженного статически изолированного отклика уровня воды на изменение НДСС [7].

Деформометрическая чувствительность вариаций уровня воды оценивается на основе приливного анализа [13, 7]. Приливной анализ данных уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5 проводился по программе ETERNA 3.0 [16], которая позволяет получить параметры приливного отклика уровня воды – амплитуды, амплитудные факторы (эквивалентные величине деформометрической чувствительности  $A_S$ ), разности фаз между фазой приливной волны в изменениях уровня и фазой приливного потенциала для от-



**Рис. 2.** Изменения уровня воды в скважине ЮЗ–5 с сентября 1997 г. по декабрь 2004 г. в сопоставлении с вариациями атмосферного давления, температурой воздуха, осадками и сейсмичностью (номера землетрясений соответствуют номерам на рис. 1 и в табл. 3). Дискретность представления временных рядов уровня воды и метеорологических параметров – одно значение в 14 сут. Сплошной линией выделен фрагмент, представленный на рис. 3а; пунктирной линией выделен фрагмент, представленный на рис. 4.



**Таблица 2.** Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 [16], период наблюдений 19 декабря 2003 г.–31 декабря 2004 г.

Волна	Амплитуда $D$ , ед. $10^{-9}$ объемной деформации (нанострейны)	Амплитуда уровня воды, $H$ , см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, $A$ , см/нанострейн	Фазовый сдвиг, град
$Q_1$	2.10	0.28	55.2	$0.132 \pm 0.002$	$152.99 \pm 1.04$
$O_1$	10.97	1.32	262.5	$0.120 \pm 0.0005$	$153.28 \pm 0.22$
$M_1$	0.86	0.10	20.6	$0.120 \pm 0.006$	$157.43 \pm 2.79$
$J_1$	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	22.2	$0.150 \pm 0.007$	$161.81 \pm 2.58$
$N_2$	1.95	0.23	107.0	$0.116 \pm 0.001$	$151.02 \pm 0.54$
$M_2$	10.18	0.92	434.0	$0.090 \pm 0.0002$	$161.07 \pm 0.13$
$L_2$	0.29	0.027	12.9	$0.094 \pm 0.007$	$172.43 \pm 4.45$
$S_2K_2$	4.74	0.50	239.0	$0.107 \pm 0.0004$	$172.95 \pm 0.24$

дельных волн (табл. 2). 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 скважине ЮЗ-5 составляют 0.1–0.2 см/сут и увеличиваются до 0.4–0.8 см/сутки при выпадении обильных осадков (рис. 3а).

Стандартная обработка данных уровнемерных наблюдений проводилась в рамках программы Diagnos, разработанной в КОМСП ГС РАН [2, 5]. Компенсация барометрических вариаций уровня воды (рис. 3а) осуществлялась по интегрированному в Diagnos алгоритму оценки комплексной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в скользящем временном окне [8].

**Оценка деформометрических свойств наблюдательной системы “скважина-резервуар”** проводилась на основе изучения барометрического и 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 [14].

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 (1 мбар = 1 гПа = 1 см водяного столба) позволяет интерпретировать амплитудную частотную передаточную функцию как зависимость барометрической эффективности  $E_b$  от частоты (рис. 3б).

Для скважины ЮЗ-5 наблюдается увеличение  $E_b$  в диапазоне периодов от 2 до 6 ч от 0.2 до 0.37–0.40 см/мбар. На периоде 6 ч достигается максимальная величина  $E_b$ , которая остается постоянной на периодах до первых десятков сут. При этом величина квадрата модуля спектра когерентности на периодах более 6 ч составляет 0.98, а разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления составляет 180°. Это указывает на хорошую изоляцию контролируемого резервуара перекрывающей толщей пород и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод в этом диапазоне периодов [14]. Уменьшение величины  $E_b$  наблюдается на периодах более 20 сут. Это связано с искажающим влиянием процесса водного питания резервуара на барометрический отклик в низкочастотной области. Рост величины  $E_b$  на периодах 2–6 ч обусловлен инерционными эффектами водообмена между скважиной и ре-

**Рис. 3.** Результаты уровнемерных наблюдений в скважине ЮЗ-5 с 26 мая по 6 ноября 2003 г.: а – среднечасовые данные измерений уровня воды и атмосферного давления и разложение исходного сигнала в изменениях уровня воды на составляющие – тренд, приливные вариации и остатки после компенсации приливного и барометрического откликов (пояснения см. в тексте). Пунктирной линией показан момент землетрясения 16.06.2003 г.,  $M_W = 6.9$ ,  $R = 328$  км (номер 5 на рис. 1, 2 и в табл. 3); б – амплитудная частотная передаточная функция от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды; в – зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин теоретической приливной деформации по [16]:  $Q_1$ ,  $O_1$ ,  $M_1$ ,  $J_1$ ,  $OO_1$  – группа суточных приливных волн;  $2N_2$ ,  $N_2$ ,  $M_2$ ,  $L_2$ ,  $S_2K_2$  – группа полусуточных приливных волн;  $R_2$  – коэффициент детерминации.

зервуаром подземных вод при двойном воздействии атмосферного давления на зеркало воды в скважине и через кровлю, перекрывающую резервуар подземных вод.

Результаты кросс-спектрального анализа позволяют сделать вывод о наличии статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменение напряженно-деформированного состояния вскрытого резервуара. Поэтому можно ожидать, что в диапазоне периодов часы – первые десятки сут скважина будет работать как деформограф без существенных искажений. На больших периодах отклик уровня воды на изменение НДСС может искажаться за счет влияния процессов водного питания резервуара подземных вод.

Наличие приливных вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 (рис. 3а) позволяет получить количественную характеристику ее деформометрической чувствительности  $A_S$  в диапазоне проявления статически изолированного отклика. В изменениях уровня воды выделены приливные волны  $Q_1, O_1, M_1, J_1, OO_1, 2N_2, N_2, M_2, L_2, S_2K_2$  [7]. В табл. 2 приводятся результаты приливного анализа для цикла 8. Величины приливной деформометрической чувствительности для отдельных волн изменяются от 0.090 до 0.150 см/10<sup>-9</sup>. На рис. 3в приводится соотношение между выделенными амплитудами приливных волн в изменениях уровня воды ( $H$ ) и теоретическими амплитудами деформации ( $D$ ) по модели приливного потенциала STED [16] (табл. 2). Коэффициент линейной зависимости между этими величинами составляет 0.105 см/10<sup>-9</sup> при значении коэффициента детерминации  $R^2 = 0.97^1$ . Величины коэффициентов линейных зависимостей между амплитудами приливных вариаций уровня воды от соответствующих величин деформации по оценкам для восьми циклов наблюдений изменяются от 0.137 до 0.096 см/10<sup>-9</sup> и составляют в среднем  $\approx 0.1$  см/10<sup>-9</sup>. Эта величина (0.1 см/10<sup>-9</sup>) может быть принята в качестве средней характеристики деформометрической чувствительности вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 во всем диапазоне приливных периодов за все время наблюдений [7]. Различие оценок  $A_S$  по данным отдельных циклов наблюдений может быть обусловлено различием технических условий регистрации и различным уровнем шумов, а также, возможно, временной изменчивостью упругих свойств водовмещающих пород.

<sup>1</sup> Если  $H_i$  – величины выделенных приливных амплитуд в изменении уровня воды,  $\bar{H}_i$  – их среднее,  $n$  – число выделенных приливных волн, то  $R^2 = 1 - SSE/SST$ , где  $SSE = \sum (H_i - \bar{H}_i)^2$ ,  $SST = (\sum H_i^2) - (\sum \bar{H}_i)^2/n$ .

Из предположения о линейном характере связи между вариациями уровня воды и деформациями водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков (10<sup>-9</sup>–10<sup>-7</sup>) [13] можно оценить сейсмотектоническую деформацию по данным об изменениях уровня воды во всем диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды (часы – первые десятки сут) по формуле:

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

где  $D$  – объемная деформация в нанострейнах: “+” соответствует растяжению, “-” – соответствует сжатию;  $\Delta h$  – изменение уровня воды в см: “+” соответствует повышению уровня воды, “-” соответствует понижению уровня воды;  $A_S$  – приливная деформометрическая чувствительность в см/нанострейн или см/10<sup>-9</sup>.

Точность регистрации вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 составляет 0.2–0.1 см, поэтому при величине  $A_S \approx 0.1$  см/10<sup>-9</sup> можно ожидать заметные изменения уровня воды при деформации вскрытого резервуара не менее первых единиц 10<sup>-9</sup>.

#### ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

По данным детальных наблюдений в течение восьми циклов (табл. 1) обнаружены вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5 в связи с девятью землетрясениями (табл. 3). Эти вариации разделены на четыре типа, три из которых соответствуют известным механизмам сейсмического воздействия (типы I–II и IV). Дополнительно выделен тип вариаций уровня воды после сильнейшего за время наблюдений Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. (тип III).

*Тип III – длительные изменения.* После Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. (№ 1 на рис. 1, 2 и в табл. 3) уровень воды понижался в течение 3.5 мес 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 IV – динамическое воздействие сейсмических волн.* В связи с тремя землетрясениями: 25.09.2003 г.,  $M_W = 8.3$ ,  $R = 1670$  км, о. Хоккайдо; 26.12.2004 г.,  $M_W = 9$ ,  $R = 8250$  км (рис. 5) и 28.03.2005 г.,  $M_W = 8.7$ ,  $R = 8200$  км, о. Суматра, обнаружены колебания уровня воды продолжительностью 3–10 ч. Максимальные амплитуды изменений уровня воды ( $\Delta h = 1.2$ –5 см) наблюдались во время вступления поверхностных волн, затем в течение нескольких часов происходили свободные колебания столба воды в скважине.

**Таблица 3.** Землетрясения, вызвавшие изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время циклов детальных наблюдений в 1997–2004 гг. и характеристика вариаций уровня воды

Номер землетрясения	Дата, ггммдд	Время в очаге, чч:мм:сс	Координаты, град.		H, км	K <sub>S</sub>	M <sub>W</sub>	Гипоцентральное расстояние R, км	Характеристика вариаций уровня воды			
			с. ш	в. д.					Тип вариаций уровня воды	Δh, см	A <sub>S</sub> , см/10 <sup>-9</sup>	Деформация по (1) D**, 10 <sup>-9</sup> (нано-стрейны)
1	971205	11:26:51	54.64	162.55	10	15.5	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	13.8	6.9	140	II	-1.0	0.116	8.6 (10.0)
3	990308	12:25:42	51.93	159.72	7	14.3	7.0	164	II	-1.7	0.113	15.0 (17.0)
4	001220	09:19:51	53.31	160.06	65	13.0	4.6*	128	II	0.6	0.110	-5.4 (-6.0)
5	030616	22:08:01	55.30	160.34	190	14.7	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	13.1	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	-	-

\* – магнитура M<sub>S</sub>; \*\* – в скобках указаны величины деформации D при A<sub>S</sub> = 0.1 см/10<sup>-9</sup>.

Такие колебания уровня воды в скважине 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 км), которые генерируют низкочастотные поверхностные волны и могут вызывать резонансный эффект в системе “скважина – резервуар”. Изучение таких вариаций уровня воды позволяет уточнять параметры резервуара, в частности, его водопроницаемость [10].

*Тип II – статическое воздействие землетрясений на напряженное состояние резервуара подземных вод.* При возникновении шести местных землетрясений (табл. 3) 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 Δh составляли 12.0–0.25 см. Для этих землетрясений по (1) оценены величины косейсмической деформации (D = 87.4–2.4 · 10<sup>-9</sup>) и характер деформации резервуара по направлению изменения уровня воды. Понижение уровня воды фиксирует деформацию расширения резервуара, повышение уровня воды – его сжатие.

Оценка приливной деформометрической чувствительности A<sub>S</sub> в каждом случае (табл. 3) проводилась по величине коэффициента линейной зависимости выделенных амплитуд приливных волн от соответствующих величин теоретической деформации (как на рис. 3в), полученной по результатам приливного анализа данных соответствующего цикла детальных наблюдений. Поэто-

му величины A<sub>S</sub> в табл. 3 изменяются от 0.137 до 0.096 см/10<sup>-9</sup>. В табл. 3 в скобках также приводятся величины D при A<sub>S</sub> = 0.1 см/10<sup>-9</sup>.

*Тип I – гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения.* Перед Кроноцким землетрясением наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды в скважине ЮЗ-5 продолжительностью около трех недель, синхронное с понижением уровня воды в скважине Е1 (рис. 7). По времени понижение уровней воды в обеих скважинах примерно совпадает с предсейсмическим перемещением GPS-станций Камчатской сети, представляющим проявление деформационного предвестника этого землетрясения [11]. 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 примерно 1.1 · 10<sup>-7</sup>.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленная выше характеристика эффектов сейсмичности в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 дает основание рассматривать эту наблюдательную систему “скважина – резервуар подземных вод” в качестве своеобразного индикатора изменения напряженно-деформированного состояния среды при воздействии сейсмотектонических процессов.

Для скважины ЮЗ-5 установлен статически изолированный пороупругий отклик уровня воды по поведению амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давле-



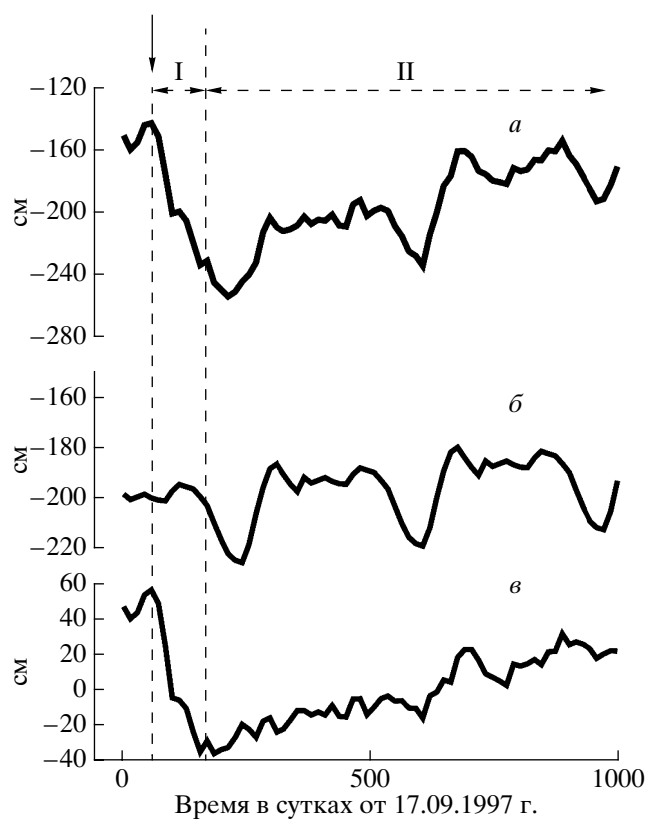
ния к изменениям уровня воды (рис. 3б). В диапазоне периодов от 6 ч до примерно 20 сут величина барометрической эффективности постоянна и составляет 0.37–0.40 см/мбар, что указывает на отсутствие влияния искажающих факторов течения подземных вод на поведение системы “скважина – резервуар” при вариациях НДСС. Отсюда следует, что в указанном диапазоне периодов вариации уровня воды прямо отражают изменения порового давления при развитии объемных деформаций водовмещающих пород. На периодах более 20–30 сут величина барометрической эффективности уменьшается вследствие влияния процесса сезонного питания и расходования подземных вод. В этой области диагностика эффектов изменения НДСС по вариациям уровня воды представляется проблематичной.

Наличие статически изолированного отклика в скважине ЮЗ-5 позволяет оценивать косейсмическую и предсейсмическую деформацию по величине приливной деформометрической чувствительности при проявлении вариаций уровня воды, соответствующих типам I и II. В работе использованы оценки теоретических величин приливной деформации в районе скважины ЮЗ-5 по [16] и получена средняя величина деформометрической чувствительности вариаций уровня воды во всем диапазоне приливных периодов  $\approx 0.1 \text{ см}/10^{-9}$ . Эта величина может уточняться при наличии деформометрических данных, полученных непосредственно в районе скважины [7].

*О механизме длительного изменения уровня воды в скважине 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 III, 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 водонасыщенных пород 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  $0.88\text{--}1.20 \cdot 10^{-7}$ .

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

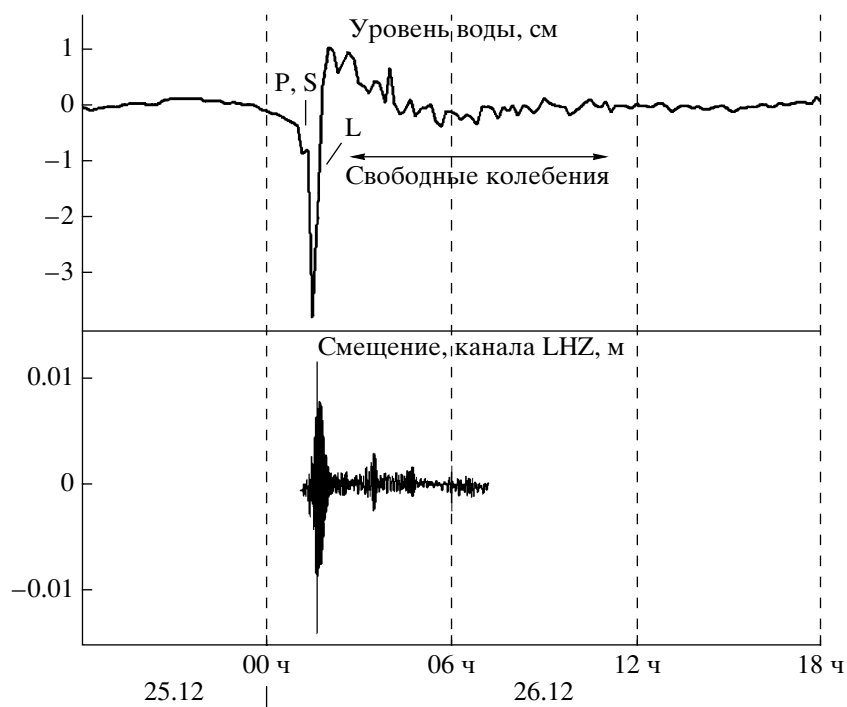


**Рис. 4.** Долговременные изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 после Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г.,  $M_W = 7.8$ ,  $R = 316$  км (показано стрелкой): а – изменения уровня воды по данным регистрации; б – выделенные годовая сезонность и линейный тренд; в – остатки в изменениях уровня воды после удаления годовой сезонности и тренда. I – фаза понижения уровня воды, II – фаза восстановления уровня воды.

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 вскрытого резервуара подземных вод. Стабильность гидрогеодинамического режима скважины за многолетний период (рис. 2) и четко выраженный годовой тренд в изменениях уровня воды указывают на наличие постоянных областей питания и разгрузки подземных вод в меловых отложениях. Гидродинамические 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.

*О бухтообразной природе гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения.* Изменение уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения имеет традиционный для гидрогеодинамических



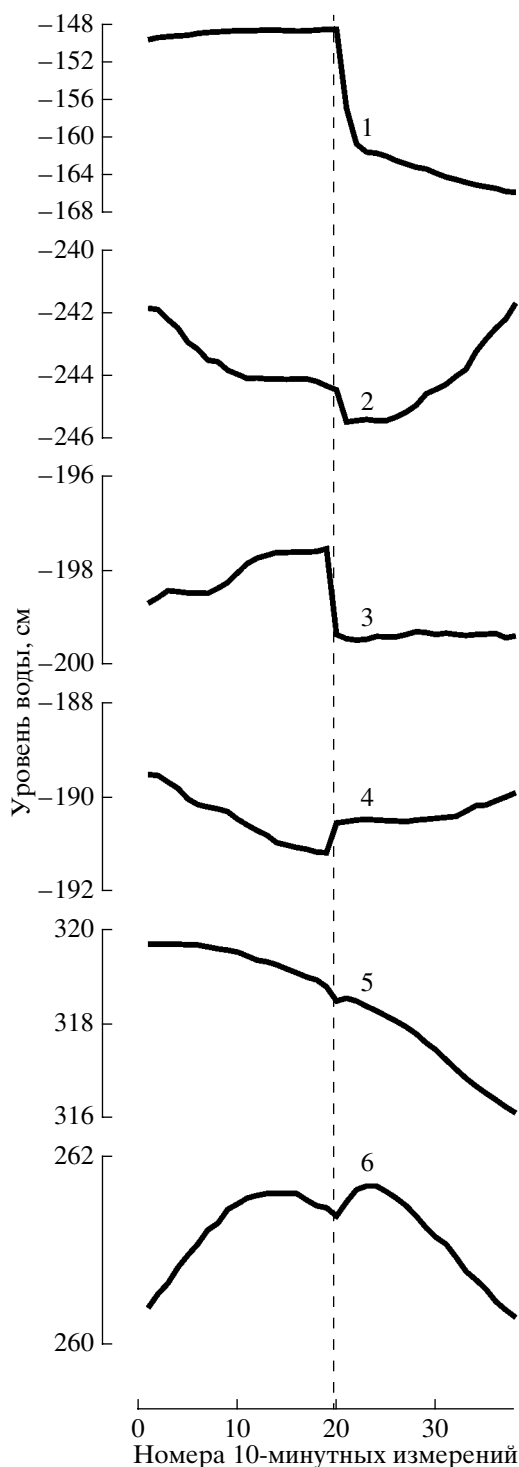
**Рис. 5.** Изменения уровня воды в скважине ЮЗ–5 во время Суматранского землетрясения 26.12.2004 г.,  $M_W = 9$ ,  $R = 8250$  км, в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, сейсмостанция Петропавловск. Стрелками указаны вариации уровня воды во время вступления  $P$ ,  $S$  и  $L$ -волн.

предвестников “бухтообразный” характер (рис. 7). 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 в водонасыщенных горных породах [9]. 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, потому что не учитывает реальные условия формирования напора в природных резервуарах подземных вод.

Наиболее амплитудные 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 сейсмотектоническое воздействие. В фазе водного питания происходит повышение напора в резервуарах подземных вод, и уровни воды в сква-

жинах повышаются. Если в это время накладывается сейсмотектоническая 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 снижении напора, сейсмотектоническое 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 сейсмотектонических 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



**Рис. 6.** Косейсмические скачки в изменении уровня воды в скважине ЮЗ-5 в моменты шести землетрясений (номера соответствуют номерам землетрясений на рис. 1, 2 и в табл. 3).

состояние. При этом время проявления внешнего возмущения (в данном случае, предсейсмической деформации в виде бухтообразного изменения уровня воды) зависит от его интенсивности, а так-

же от индивидуальных особенностей системы “скважина–резервуар”, определяющих степень ее инерционности, зависящей, в первую очередь, от совершенства связи скважины и резервуара, упругих свойств водовмещающих пород и порового флюида, процессов течения подземных вод.

**Выводы.** 1. Представлен способ количественной оценки предсейсмической и косейсмической деформации водовмещающих пород по данным уровневых наблюдений на основе комплексного анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине. Анализ барометрического отклика позволил определить частотный диапазон проявления неискаженного статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменения напряженно-деформированного состояния среды (первые часы – первые десятки сут). Приливной анализ вариаций уровня воды позволил получить величину приливной деформометрической чувствительности вариаций уровня воды ( $\approx 0.1 \text{ см}/10^{-9}$ ), которая может быть использована во всем диапазоне проявления статически изолированного отклика уровня воды для оценки объемной деформации водовмещающих пород.

2. В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 выявлены четыре типа эффектов под влиянием землетрясений:

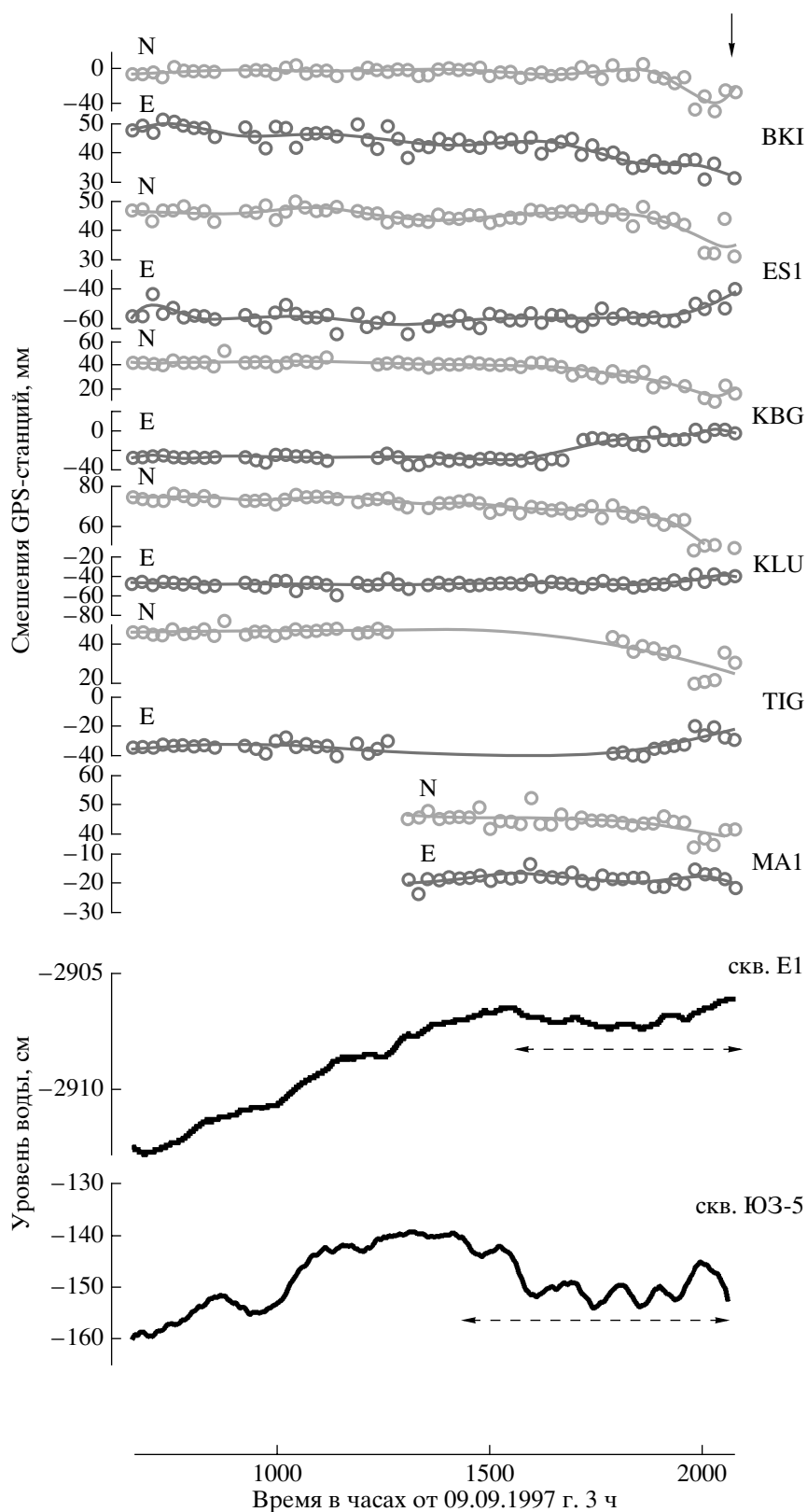
- гидрогеодинамический предвестник Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M_w = 7.8$ ,  $R = 316$  км (тип I);

- косейсмические скачки уровня воды вследствие изменения статического напряженного состояния резервуара подземных вод при образовании разрывов в очагах местных землетрясений (тип II);

- постсейсмическое понижение уровня воды в результате воздействия Кроноцкого землетрясения с последующим восстановлением с общей продолжительностью около 2.5 лет (тип III);

- свободные и вынужденные колебания уровня воды при прохождении поверхностных сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений ( $M_w = 9.0 - 8.3$ ,  $R = 1667 - 8250$  км) (тип IV).

3. В связи с подготовкой и реализацией сильнейшего за время наблюдений Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M_w = 7.8$ ,  $R = 316$  км, наблюдалось последовательное проявление вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, соответствующих типу I – гидрогеодинамический предвестник, синхронный с изменениями уровня воды в скважине Е1 и предсейсмическими перемещениями GPS-станций на Камчатке; типу II – косейсмический скачок уровня воды в момент землетрясения и типу III – падение и длительное восстановление порового давления в результате изменения напряженного состояния и фильтрационных свойств водонасыщенных пород при сейсмических сотрясениях.



**Рис. 7.** Изменения уровней воды в скважинах Ю3-5, E1 и смещения GPS-станций на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.97 г.,  $M_W = 7.8$  (показано стрелкой): BKI, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1 – GPS-станции Камчатской сети; N – смещение в направлении Ю-С, E – смещение в направлении З-В [11]. Пунктирными стрелками показано время проявления гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды.

## 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. Балеста С.Т., Копылова Г.Н., Латыпов Е.Р., Кузьмин Ю.Д. Комплексные геофизические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 90–100.
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., 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., 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., г. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2003. С. 393 – 399.
6. 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. междисциплин. научн. симпоз. Хабаровск: ДВО РАН, 2004. С. 134 – 149.
7. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным равномерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. 2004. С. 405–421.
8. Любушин А.А. (мл.) Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.
9. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
10. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennett 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 (1). P. 189–198.
12. 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. 143. P. 469–477.
13. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
14. 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.
15. Wakita H. Water level as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. № 189. P. 553–555.
16. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719–8721.

## Earthquake-induced Water Level Changes in the Yuz-5 Well Kamchatka

G. N. Kopylova

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

The Kamchatkan Seismological Technique Testing Team. Geophysical Service. Russian Academy of Sciences conducted digital recording of water level and air pressure in the YuZ-5 well, Kamchatka during the period 1997–2004 with a view to monitoring seismotectonic processes and searching for water level changes preceding earthquakes. This paper describes the system used for observing and processing water level observations and presents a method for quantitative assessment of seismotectonic strain in water-bearing rocks by estimating the statically isolated response and tidal strain sensitivity of water level variations. We describe four types of effect arising in water level changes in the YuZ-5 well induced by earthquake precursory processes (type I), the changes in the static stress field caused by earthquake rupture (type II), as well as long-continued postseismic water level variations (type III) and water level changes due to the passage of seismic surface waves (type IV). The December 5. 1997 Kronotsky in the ( $M_W = 7.8$ ,  $R = 316$  km) had been preceded by changes in the YuZ-5 water level lasting three weeks: this precursor consisted in a bay-like level lowering of amplitude 11 cm occurring simultaneously with a water level lowering in the E1 well and with preseisms of Kamchatka GPS stations. We provide estimates of the magnitude and character of the coseismic and preseismic strain changes in water-saturated rocks around the YuZ-5 well.