

**О МЕХАНИЗМЕ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДВЕСТНИКА КРОНОЦКОГО  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 5 ДЕКАБРЯ 1997 г.,  $M_w = 7.8^*$**

*Г.Н. Копылова, С.В. Болдина*

*Камчатский филиал Учреждения Российской академии наук Геофизической службы РАН,  
бульвар Пийна 9, г. Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: gala@emsd.iks.ru*

Поступила в редакцию 10 ноября 2011 г.

В скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка, зарегистрированы понижения уровня воды с амплитудами 11 и 1 см в течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г.,  $M_w = 7.8$ . Такие понижения, выделенные в гидрогеодинамический предвестник этого землетрясения, развивались синхронно с горизонтальными перемещениями GPS-станций сети КАМNET, расположенных на расстояниях до первых сотен км от будущего очага. Обсуждается механизм формирования гидрогеодинамического предвестника с привлечением модели упругого статически изолированного отклика уровня воды на деформацию водовмещающих пород при приливных и при относительно кратковременных барометрических и сеймотектонических воздействиях. Показано, что понижение уровня воды в обеих скважинах можно объяснить неискаженным откликом порового давления на квазиупругую деформацию объемного расширения водовмещающих пород при развитии предсейсмических движений на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения. По данным уровнемерных наблюдений, величины предсейсмической деформации в районах скважин составляли  $D_i = (0.6-0.8) \cdot 10^{-7}$ .

**Ключевые слова:** скважина, водовмещающая порода, уровень воды, приливная чувствительность, деформация, очаг землетрясения, предвестник, Кроноцкое землетрясение, п-ов Камчатка.

**ВВЕДЕНИЕ**

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах рассматриваются в качестве одного из методов контроля напряженно-деформированного состояния верхних горизонтов земной коры и поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Вместе с тем, вопросы оценки информативности метода и его эффективности в отношении диагностики гидрогеодинамических предвестников землетрясений остаются открытыми. Определенные трудности при рассмотрении этих вопросов связаны с тем, что наблюдательные скважины характеризуются разнообразием технического строения, различием водовмещающих пород, их фильтрационных и упругих свойств, а также условиями формирования гидродинамического режима. Роль перечисленных факторов в формировании откликов уровня воды на изменение напряженного состояния флюидонасыщен-

ной геологической среды немного изучена по экспериментальным данным.

Вариации атмосферного давления, земные приливы и изменения напряженного состояния геологической среды при образовании разрывов в очагах местных землетрясений воздействуют на водообмен между водовмещающей породой и стволом скважины и сопровождаются соответствующими откликами в изменениях уровня воды. По совокупности откликов уровня на эти воздействия можно диагностировать наличие и параметры таких специфических условий для отдельной скважины, когда фильтрация воды и инерционность водообмена между стволом скважины и вмещающей породой не искажают отклик уровня на изменение порового давления при упругой деформации [5, 8, 11, 23, 24]. Оценка деформометрических свойств отдельных скважин – деформометрической чувствительности уровня воды и диапазона периодов проявления линейной связи между изменениями уровня воды и упругой деформацией водовмещающих пород (статически изолированные

\* Публикуется в дискуссионном порядке.

условия) – может проводиться по результатам анализа барометрического и приливного откликов уровня воды и данных о косейсмических скачках уровня при местных землетрясениях [8].

Диапазон периодов проявления статически изолированных условий оценивается по результатам кросс-спектрального анализа данных по изменениям уровня воды (выходной сигнал) и атмосферного давления (входной широкополосный сигнал). Характеристиками связи вариаций уровня воды и атмосферного давления в зависимости от величины периода являются амплитудная передаточная функция и изменение разности фаз. По прямолинейному участку поведения амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды оценивается диапазон периодов проявления статически изолированных условий для отдельной скважины [5, 8, 11]. Деформометрическая чувствительность уровня воды может оцениваться по величине его приливной чувствительности по соотношению амплитуд отдельных приливных волн в изменениях уровня и соответствующих величин измеренной или теоретической деформации. Примеры оценки параметров статически изолированных условий для отдельных скважин приводятся в [5, 11].

Оценка величин упругих параметров водовмещающей породы для статически изолированных условий может производиться по формулам теории порупругости с использованием экспериментально полученных величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности уровня воды по отношению к площадной ( $A_s$ ) и объемной ( $A_v$ ) деформациям. Соответствующие выражения приводятся в работах [9, 24, 26].

Изложенный выше подход к обработке данных уровнемерных наблюдений позволяет оценивать пригодность отдельных скважин в качестве природно-технических деформографов при развитии квазиупругой деформации водовмещающих пород в диапазоне периодов проявления статически изолированных условий при относительно кратковременных подвижках по разломам и при асейсмических движениях на стадиях подготовки землетрясений.

Необходимо отметить, что вопрос о механизмах формирования гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды не вполне ясен. В первую очередь, из-за неопределенности процессов, развивающихся в верхних горизонтах земной коры при подготовке отдельных землетрясений. В [6, 16] в качестве основных процессов на стадиях подготовки землетрясений рассматривается упругое деформиро-

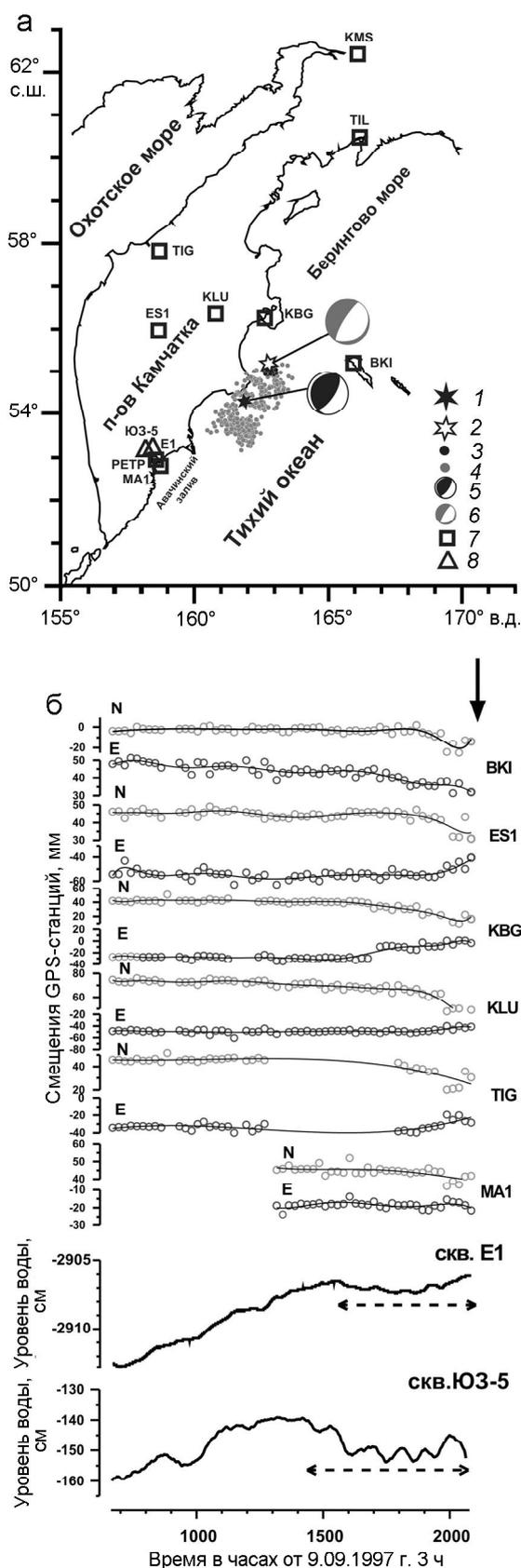
вание геологической среды и развитие трещинной дилатансии в горных породах. Определение механизмов формирования гидрогеодинамических и других видов предвестников при сильных землетрясениях на основе данных наблюдений представляет одну из ключевых задач в решении проблемы средне-краткосрочного сейсмического прогноза.

5 декабря 1997 г. у Тихоокеанского побережья Камчатки произошло землетрясение с магнитудой  $M_w = 7.8$  (Кроноцкое землетрясение, далее КЗ) (рис. 1а). В течение двух суток до основного толчка вблизи его инструментального эпицентра развивался рой форшоков с величинами энергетических классов  $K_s = 9.0-12.8$  ( $M_w = 3.8-5.6$ ). КЗ сопровождалось многочисленными афтершоками, оконтурившими очаговую область размером  $220 \times 140$  км. Инструментальный эпицентр КЗ располагался в северо-восточной части очаговой зоны на глубине 25–33 км. Очаг КЗ имеет параметры, типичные для землетрясений зоны субдукции (табл. 1) [14].

Перед КЗ были зарегистрированы разнообразные предвестники, в т. ч. перемещения GPS-станций сети KAMNET [3, 13, 20], аномальные изменения химического состава воды в глубоких самоизливающихся скважинах [18], стабилизация фазы приливной компоненты высокочастотного сейсмического шума [14] и др. [10]. В скважинах ЮЗ-5 и Е-1 были зарегистрированы бухтообразные понижения уровней воды продолжительностью около трех недель, синхронные с предсейсмическими перемещениями GPS-станций (рис. 1б). Амплитуда понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 составила 11 см, в скв. Е-1 – 1 см. В [5] такие понижения уровня рассматриваются в качестве гидрогеодинамических предвестников КЗ.

В момент КЗ в скв. ЮЗ-5 был также зарегистрирован косейсмический скачок понижения уровня с амплитудой 12 см [5]. В скважине Е-1 косейсмический скачок не проявлялся. Прохождение высокочастотных сейсмических волн от КЗ также сопровождалось различной постсейсмической реакцией уровней: понижением уровня в скв. ЮЗ-5 на 1 м [5] и повышением уровня в скв. Е-1 на 30 см [4]. Постсейсмические вариации уровней в обеих скважинах развивались в течение трех месяцев.

В работе обсуждается механизм формирования гидрогеодинамического предвестника КЗ с привлечением данных наблюдений методом GPS геодезии и теоретической модели упругого статически изолированного отклика уровня воды на деформацию водовмещающих пород при приливных, барометрических и сеймотектонических воздействиях.



### ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИН, ОЦЕНКА ИХ ДЕФОРМОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, УПРУГИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД И ПРЕДСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Автоматизированные уровнемерные наблюдения на скважинах ЮЗ-5 и Е-1 проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН с 1996 г. [4, 5]. Синхронная регистрация вариаций уровня воды и атмосферного давления производится каждые 10 мин с использованием прецизионных датчиков уровня и цифровой регистрирующей аппаратуры, разработанной в ОКБ Института физики Земли РАН [1] (1996–2001 гг.) и в ООО “Полином”, г. Хабаровск (2002 г. – настоящее время). Чувствительность регистрации уровня воды составляет  $\pm 0.01$  см, атмосферного давления –  $\pm 0.1$ – $0.2$  гПа.

Характеристика скважин ЮЗ-5 и Е-1, особенности уровня режима, а также результаты приливного и барометрического анализа вариаций уровня воды приводятся в работах [4, 5, 11]. В таблице 2 дается их краткая сводка.

Скважина ЮЗ-5 контролирует напорные пресные подземные воды в трещиноватых алевролитах позднемерелового возраста. Для уровня режима скважины характерны годовая сезонность, реакция на весеннее таяние снега и выпадение обильных жидких осадков. Такие особенности режима скважины, а также низкая минерализация воды показывают, что контролируемые водовмещающие породы находятся в зоне активного водообмена. В изменениях уровня воды проявляются четко выраженные земноприливные и барометрические вариации [5]. Величины барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувстви-

**Рис. 1.** Схема расположения скважин ЮЗ-5 и Е-1, GPS станций сети КАМNET, эпицентров Кроноцкого землетрясения, его фор- и афтершоков (а).

1 – эпицентр Кроноцкого землетрясения; 2 – эпицентр “медленного землетрясения”,  $M_w=7.7$ , предшествовавшего Кроноцкому землетрясению [3, 20]; 3 – эпицентры форшоков с 3 по 5 декабря 1997 г.; 4 – эпицентры афтершоков с 5 по 12 декабря 1997 г.; 5 – диаграмма механизма СМТ Кроноцкого землетрясения; 6 – диаграмма механизма “медленного землетрясения”, по [3, 20]; 7 – GPS-станции BKI, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1, PETP; 8 – скважины.

Изменения уровней воды в скважинах ЮЗ-5, Е-1 и смещения GPS-станций на стадии подготовки КЗ (показано стрелкой) (б).

N – смещение в направлении Ю-С, E – смещение в направлении З-В. Опорная станция PETP. Горизонтальными пунктирными линиями показано время проявления гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды.

Таблица 1. Данные о Кроноцком землетрясении (КЗ), сдвиговом точечном источнике предсейсмических движений (ПКЗ), по [3, 20], и оценка объемной ко- и предсейсмической деформации в районе наблюдательных скважин.

Землетрясение	Дата, ГТМДУ / время в очаге, ЧЧ.ММ	Координаты, град.		H <sub>с</sub> , км	M <sub>w</sub>	Сейсмический момент, M <sub>0</sub> , 10 <sup>20</sup> Н·м	Гипоцентральное расстояние, R, км	Параметры очага, градусы				Характеристика вариаций уровня воды			
		с. ш.	в. д.					азимут прогибания	разрыва плоскости	угол падения	разрыва плоскости	направление	направление	амплитуда изменения уровня воды в скв. ЮЗ-5, Δh, см	объемная деформация в районе скв. ЮЗ-5, D <sub>b</sub> 10 <sup>-9</sup>
КЗ	971205/ 11:27	54.64	162.55	33	7.8	5.3	320	202	23	-74	75±4	-12.0	-	-	
ПКЗ	≈971120 по 971205	55.20	162.80	30	7.7	4.2	360	252	79	95	68±4	-11.0	-1.0	33–130	

Таблица 2. Характеристика наблюдательных скважин.

Скважина, а. о. устья, м	Координаты, град		Глубина, м	Уровень, м	Водо-вмещающие породы	Химический состав воды	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут	Барометрическая эффективность E <sub>b</sub> , см/гПа	Деформометрическая чувствительность A <sub>g</sub> /A <sub>v</sub> , см/10 <sup>-9</sup>
	с.ш.	в.д.							
ЮЗ-5 70	53.17	158.41	$\frac{800}{310-800}$	1.5	алевролиты, K <sub>2</sub>	$M_{0.4} \frac{HCO_3 - SO_4}{Na - Ca}$	7.8	0.39	0.107/0.161
Е-1 180	53.26	158.48	$\frac{665}{625-647}$	29	туфы N <sub>2</sub>	$M_{2.5} \frac{Cl - CO_3}{Na}$ свободный газ N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub>	0.005	0.01	0.011/0.016
1303 31	53.08	158.21	$\frac{717}{517-717}$	25	туфы N <sub>2</sub>	$M_{0.7} \frac{SO_4 - HCO_3}{Na - K}$	2.1	0.43	0.143/0.215

Таблица 3. Параметры водовмещающих пород, вскрытых наблюдательными скважинами.

Скважина вскрытая мощность водовмещающих пород d, м	Дренированная сжимаемость скелета породы $\beta$ , $\text{Па}^{-1} \cdot 10^{-11}$	Модуль сдвига G, $\text{Па} \cdot 10^{10}$	Коэффициент Скемптона B	Удельная упругая емкость $S_s$ , $\text{м}^{-1} \cdot 10^{-7}$	Пористость $\phi$	Упругая водоотдача S
ЮЗ-5/100	12.5	1.34	0.67	16.9	0.11	$16.9 \cdot 10^{-5}$
E-1/22	7.59	0.79	0.044÷0.17	29.0	0.05	$5.8 \cdot 10^{-5}$
1303/200	7.37	0.81	0.64	9.81	0.06	$19.6 \cdot 10^{-5}$

тельности по отношению к теоретической объемной деформации резервуара  $A_v$  приводятся в табл. 2.

С использованием кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня и атмосферного давления было установлено, что постоянное значение амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды фиксируется в диапазоне периодов от первых часов до первых десятков суток (при разности фаз  $180^\circ$ ). Это позволяет принять гипотезу о статически изолированных условиях в системе “скважина – водовмещающая порода” в соответствующем диапазоне периодов и оценить величину барометрической эффективности  $E_b = -0.39$  см/гПа, характеризующую неискаженный барометрический отклик уровня воды [5, 8, 11].

С использованием результатов приливного анализа вариаций уровня воды по программе ETERNA 3.0, приведенных в [5, 8, 11], оценены величины приливных чувствительностей уровня по отношению к теоретическим площадной ( $A_s = 0.107 \pm 0.005$  см/ $10^9$ ) и объемной ( $A_v = 0.161 \pm 0.008$  см/ $10^9$ ) деформациям. Приливные чувствительности оценивались по величинам коэффициентов линейной зависимости амплитуд приливных волн в изменениях уровня от соответствующих величин теоретической деформации. Точности оценок  $A_s$  ( $\pm 0.005$  см/ $10^9$ ) и  $A_v$  ( $\pm 0.008$  см/ $10^9$ ) определяются некоторым различием величин амплитудных факторов для отдельных волн суточной и полусуточной групп в изменениях уровня воды по отношению к теоретической приливной деформации (табл. 2 в [5]).

По формулам теории пороупругости с использованием оцененных величин  $E_b$  и  $A_s$  были рассчитаны величины упругих параметров водовмещающих пород и пористости  $\phi$  для статически изолированных условий в системе “скважина – водовмещающая порода”: сжимаемость скелета породы  $\beta$ , модуль сдвига G, коэффициент Скемптона B, удельная упругая емкость  $S_s = \rho g(\beta + \phi\beta_r)$ , где  $\rho$  – плотность воды,  $1000$  кг/ $\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $9.8$  м/ $\text{с}^2$ ;  $\beta_r$  – сжимаемость подземной воды.

При расчетах параметров в табл. 3 для скв. ЮЗ-5 принималось, что величина сжимаемости подземной воды при ее обычных температурах и давлениях соответствует значению  $\beta_r = 4.4 \cdot 10^{-10}$   $\text{Па}^{-1}$  [17], а сжимаемость твердой фазы скелета породы соответствует сжимаемости кварца  $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10}$   $\text{Па}^{-1}$  [26]. В табл. 3 также приводится расчетное значение упругой водоотдачи водовмещающих пород  $S = S_s \cdot d$ , где d – суммарная мощность зон водопритока, равная  $100$  м.

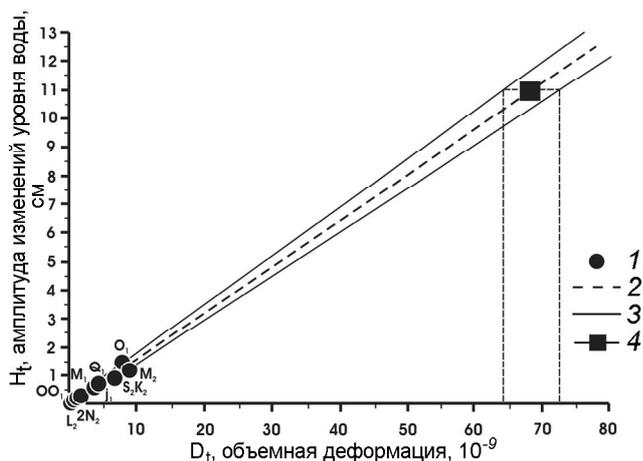
Полученные оценки  $\beta$  и G (табл. 3) близки к их величинам для песчаников, по данным лабораторных испытаний образцов пород:  $\beta = (7.7-12.5) \cdot 10^{-11}$   $\text{Па}^{-1}$ ,  $G = (0.6-1.3) \cdot 10^{10}$  Па [26]. Это показывает, что упругие свойства водовмещающих пород, вскрытых скв. ЮЗ-5, являются характерными для водонасыщенных плотных песчанистых пород.

Водопроницаемость водовмещающих пород  $T = 7.8$  м<sup>2</sup>/сут рассчитывалась по данным откачки с использованием модели линейного стока для напорного, изотропного, неограниченного резервуара [15].

В работах [2, 9] приводятся результаты моделирования реакции уровня воды в скв. ЮЗ-5 на периодические изменения порового давления с учетом параметров резервуара S, T и геометрических размеров скважины с использованием математической модели [21]. Результаты моделирования показали, что на периодах часы–первые десятки суток не ожидается искажение амплитудного соотношения между вариациями уровня воды в скважине и изменениями порового давления. Это позволяет использовать среднюю величину амплитудного соотношения между суточными и полусуточными компонентами приливных вариаций уровня воды и соответствующими величинами объемной деформации в качестве нормирующего коэффициента для оценки сейсмотектонической деформации водовмещающих пород во всем диапазоне периодов проявления статически изолированных условий по формуле:

$$D_t = -\Delta h_t / A_v, \quad (1)$$

где  $D_t$  – объемная деформация в  $10^{-9}$ : “+” соответствует растяжению, “–” – соответствует сжатию;  $\Delta h_t$  – изменение уровня воды в см: “+” соответствует повышению уровня воды, “–” соответствует понижению



**Рис. 2.** Зависимость выделенных амплитуд приливных волн суточной и полусуточной групп в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 ( $H_t$ ) от теоретических величин приливной объемной деформации  $D_t$ .

1 — приливные волны; 2 — тренд линейной зависимости амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды от соответствующих теоретических величин приливной объемной деформации при значении коэффициента корреляции  $K=0.98$ ; 3 — 95 % доверительный интервал для линейной зависимости приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин объемной деформации; 4 — амплитуда предсейсмического понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 перед Кроноцким землетрясением с учетом линейной связи  $H_t$  и  $D_t$ .

нию уровня воды;  $A_v$  — приливная чувствительность уровня воды, определяемая по наклону зависимости амплитуд суточных и полусуточных приливных волн в изменениях уровня воды от соответствующих величин теоретической объемной деформации (рис. 2) [5].

Продолжительность развития гидрогеодинамического предвестника КЗ в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 примерно соответствует по периоду верхней границе статически изолированных условий в системе “скважина – водовмещающая порода”. В этом случае оценка деформации расширения резервуара на стадии подготовки КЗ составляет  $D_t = (68 \pm 4) \cdot 10^{-9}$  (рис. 2, табл. 1). Эта величина относится к интервалу глубин 310–800 м (в среднем 500 м). Точность оценки  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$  определяется различием величин амплитудных факторов для отдельных приливных волн суточной и полусуточной групп в изменениях уровня воды. Амплитудные факторы рассчитывались по программе ETERNA 3.0 с использованием модели приливного потенциала STED [27].

В табл. 1 также приводится величина косейсмической деформации  $D_t = (75 \pm 4) \cdot 10^{-9}$ , полученная по (1) с использованием амплитуды понижения уровня воды  $\Delta h = -12$  см в момент КЗ. Величина косейсмической деформации при КЗ по уровнемерным дан-

ным хорошо согласуется по амплитуде (в пределах одного порядка величин) и по знаку (расширение) с результатами расчета объемной косейсмической деформации в районе скважины по модели дислокационного источника в однородном упругом полупространстве с параметрами очага из международного каталога СМТ [12].

Скважина Е-1 вскрывает напорные солоноватые подземные воды в туфах неогенового возраста, находящиеся в гидродинамической зоне затрудненного водообмена. На затрудненные условия водообмена указывают особенности уровня режима скважины, в частности, отсутствие годовой сезонности в изменениях уровня, а также химический состав воды (табл. 2). Водопроницаемость водовмещающих пород  $T = 0.005$  м<sup>2</sup>/сут оценивалась по данным налива в скважину в 1991 г. [4].

В составе подземной воды присутствует газ метаново-азотного состава. Наличие газа приводит к увеличению сжимаемости порового флюида по сравнению с обычной водой. Из-за этого свойства системы “скважина – водовмещающая порода” становятся резко отличными от свойств скважин, вскрывающих обычные слабоминерализованные воды без газа. В скв. Е-1 это проявляется в отсутствии реакции уровня воды на земные приливы и в его слабой реакции на изменения атмосферного давления [4]. Величина барометрической эффективности в диапазоне периодов от двух суток до десятков суток составляет  $E_b = -0.01$  см/гПа [4, 8, 11]. Такие особенности уровня режима скв. Е-1 не позволяют оценить упругие параметры и пористость водовмещающих пород с использованием величин барометрической эффективности  $E_b$  и приливной чувствительности  $A_s$  по методике, примененной к скв. ЮЗ-5.

С учетом поведения амплитудной частотной передаточной функции от изменений атмосферного давления к изменениям уровня воды [4, 8] и обстановки застойных условий формирования гидрогеодинамического режима для скв. Е-1 принималась гипотеза о статически изолированных условиях в системе “скважина – водовмещающая порода” в диапазоне периодов от двух суток до десятков–сотен суток. В таком случае применение формул теории поропругости для оценки параметров  $G$  — модуля сдвига и  $B$  — коэффициента Скемптона возможно при наличии данных о величинах деформометрической чувствительности уровня воды ( $A_v, A_s$ ) и величинах сжимаемостей скелета водовмещающей породы  $\beta$ , твердой фазы скелета  $\beta_u$  и порового флюида  $\beta_f$ . Для определения величины  $B$  могут использоваться формулы [9, 22, 24]:

$$V = (\rho g A_s \beta) / [1 + \rho g A_s (\beta - \beta_u)], \quad (2)$$

$$V = (\beta - \beta_u) / [(\beta - \beta_u) + \phi(\beta_f + \beta_u)], \quad (3)$$

$$V = \rho g \beta_u A_v, \quad (4)$$

где  $\phi$  – пористость резервуара;  $\beta_u = 0.3 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> (кварц).

Пористость  $\phi$  принималась равной не более 0.06 по аналогии с величиной пористости туфогенно-осадочных неогеновых отложений, вскрытых скв. 1303 (ОАО «Камчатгеология») в диапазоне глубин 517–717 м (средняя глубина 617 м). Характеристика скв. 1303 приводится в табл. 2. Она расположена на расстоянии 17 км к юго-западу от скв. Е-1. Наблюдения на скв. 1303 проводятся с 2002 г.

Для скв. 1303, так же как и для скв. ЮЗ-5, по результатам кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления были диагностированы статически изолированные условия в диапазоне периодов часы–первые десятки суток, оценены параметры барометрического и приливного откликов уровня воды [11], а также пористость, упругие и фильтрационные параметры водовмещающих пород (табл. 3). Существенным отличием скважин 1303 и ЮЗ-5 от скв. Е-1 является отсутствие газа в составе подземной воды и формирование ее гидродинамического режима в условиях активного водообмена.

Для грубой оценки деформометрической чувствительности уровня в скв. Е-1 использовались данные по проявлению гидрогеодинамического предвестника КЗ (рис. 16). При этом полагалось, что величины предсейсмической деформации были примерно одинаковыми в районах обеих наблюдательных скважин  $\Delta h_{ЮЗ-5} / A_{VЮЗ-5} = \Delta h_{Е-1} / A_{VЕ-1}$ . Амплитуды понижения уровней  $\Delta h$  составили в скв. ЮЗ-5 11 см, в скв. Е-1 – 1 см (рис. 16). Отсюда величина деформометрической чувствительности уровня воды в скв. Е-1 по отношению к теоретической объемной деформации  $A_v$  составляет примерно  $0.015$  см/ $10^{-9}$ , а по отношению к теоретической площадной деформации  $A_s = 0.010$  см/ $10^{-9}$  (при величине коэффициента Пуассона  $\nu = 0.25$ ).

Величины упругой водоотдачи резервуара  $S$  и сжимаемости подземной воды  $\beta_f$  оценивались по результатам моделирования восстановления уровня воды после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины 11 марта 2009 г. (рис. 3). Спуск датчика сопровождался повышением уровня воды на 13 см с последующей его стабилизацией в течение 44 сут. Данные 10-минутных замеров во время стабилизации уровня воды сравнивались с эталонными кривыми понижения уровня при заданных величинах водопроницаемости  $T$  и упругой водоотдачи  $S$ , полученными из решения уравнения

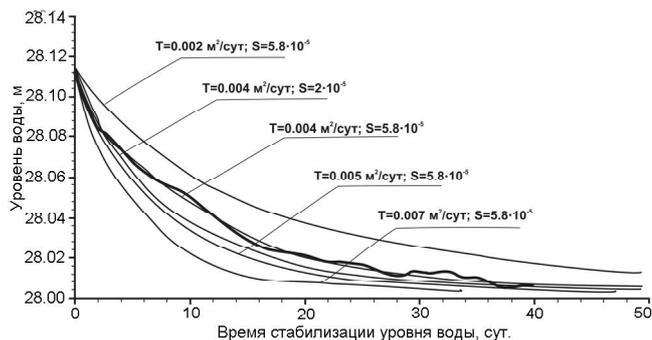


Рис. 3. Стабилизация уровня воды в скважине Е-1 после спуска датчика акустической эмиссии в ее ствол.

Жирной линией показано изменение уровня воды по данным 10-минутных измерений, тонкими линиями показаны расчетные понижения уровня воды при различных величинах водопроницаемости  $T$  и упругой емкости  $S$ .

нестационарной фильтрации для совершенной скважины по степени и характеру вскрытия напорного однородного, изотропного и неограниченного по протяженности резервуара [15]. Величина сжимаемости скелета породы  $\beta = 7.37 \cdot 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>, полученная для скважины 1303, использовалась в качестве начального приближения при оценке величины упругой водоотдачи водовмещающих пород, вскрытых скв. Е-1.

По результатам моделирования наиболее приемлемой величиной сжимаемости подземной воды при водопроницаемости  $T=0.004$  м<sup>2</sup>/сут и упругой водоотдаче  $S = 5.8 \cdot 10^{-5}$  (рис. 3) является  $\beta_f = 4.4 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>. Такая величина  $\beta_f$  на порядок больше, чем сжимаемость обычной воды, и указывает на небольшое содержание свободного газа в порово-трещинном пространстве водовмещающей породы. Величина сжимаемости скелета породы  $\beta$  (табл. 3) получена из формулы  $S=d[\rho g(\beta+\phi\beta_f)]$ , где  $d$  – мощность резервуара, равная 22 м.

С использованием (2) величина  $V = 0.07$ ; по (3)  $V = 0.17$ ; по (4)  $V = 0.044$ . Таким образом, по (2) – (4) получена оценка величины  $V$  в диапазоне значений 0.04–0.17, в среднем 0.09.

Величина модуля сдвига определялась по формуле [9, 22, 24]:

$$G=3/2[(1-2\nu)/\beta(1+\nu)], \quad (5)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона для дренированных условий ( $\nu = 0.25$ ).

При сравнении упругих параметров водовмещающих пород для скважин Е-1 и 1303, сложенных одинаковыми породами – туфами неогенового возраста, видно, что величины сжимаемости скелета породы  $\beta$  и модуля сдвига  $G$  различаются незначительно

(табл. 3). При этом наблюдается большое различие в величинах коэффициента Скемптона, характеризующего связь общего напряжения в скелете и порового давления:  $V = -3p/\sigma$ , где  $\sigma$  – сумма главных напряжений  $\sigma = 1/3(s_{11} + s_{22} + s_{33})$ , и  $p$  – поровое давление [25]. Для водовмещающих пород скв. Е-1 получены весьма низкие его значения ( $V = 0.044-0.17$ ), показывающие слабую передачу общего напряжения в породе на поровое давление. Низкие величины  $V$  хорошо согласуются с данными о слабой чувствительности уровня воды в скв. Е-1 к упругим деформациям водовмещающей породы, вызванным барометрическими, приливными и косейсмическими воздействиями. Наиболее вероятной причиной этого является повышенная сжимаемость подземной воды за счет присутствия газа в ее составе.

Для оценки величины предсейсмической деформации в районе скв. Е-1 использовалась формула связи изменения давления подземной воды  $\Delta p$  и объемной деформации  $\Delta \epsilon$  для статически изолированных условий [23]:

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1+\nu_v)/(1-2\nu_v)]\Delta \epsilon. \quad (6)$$

Такая связь определяется упругими параметрами резервуара: коэффициентом Пуассона для недренированных условий (принималось  $\nu_v = 0.3$ ), модулем сдвига  $G$  и коэффициентом Скемптона  $V$  (табл. 3).

Полагая, что амплитуда гидрогеодинамического предвестника КЗ в изменениях уровня воды  $\Delta h = -1$  см полностью определяется понижением порового давления, можно записать

$$\Delta \epsilon = -(\rho g \Delta h)/(2/3GB[(1+\nu_v)/(1-2\nu_v)]). \quad (7)$$

Оценки деформации объемного расширения в районе скв. Е-1 на стадии подготовки КЗ составляют:

$$\Delta \epsilon = (0.33-1.3) \cdot 10^{-7},$$

$$\Delta \epsilon_{cp} = 0.8 \cdot 10^{-7}.$$

Диапазон величин  $\Delta \epsilon = (0.33-1.3) \cdot 10^{-7}$  определяется, в основном, диапазоном оценок величины коэффициента Скемптона по (2)–(4), которые различаются примерно в четыре раза. Это свидетельствует о приблизительном, оценочном характере величины предсейсмической деформации водовмещающих пород в районе скв. Е-1.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ПО [3, 20]

Со второй половины 1996 г. на Камчатке действует сеть GPS-станций KAMNET в составе девяти пунктов постоянных измерений. По результатам регистрации перемещений GPS-станций определены среднегодовые скорости смещения земной поверхности в пунктах наблюдений, которые составляют от первых мм/год до первых десятков мм/год. Наблюда-

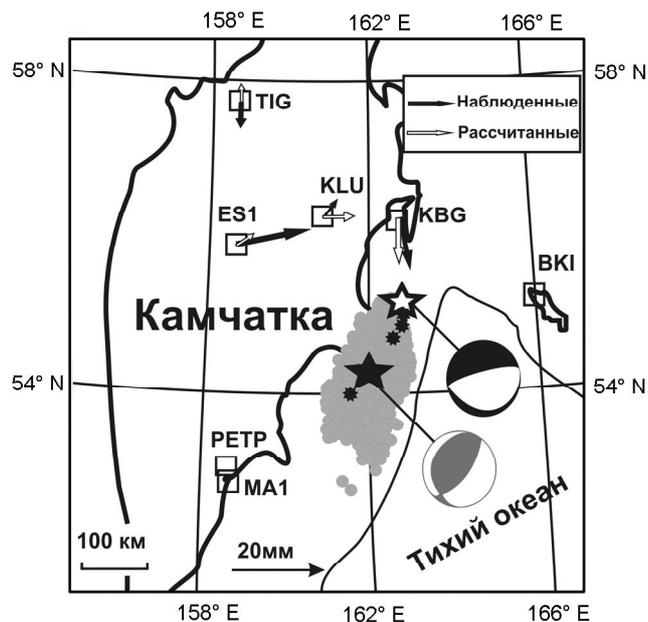


Рис. 4. Наблюдаемые амплитуды предсейсмических движений перед Кроноцким землетрясением и результаты их инверсии для случая чистого сдвигового источника общего вида, по [3, 20].

Источник располагался в области форшоков (показаны маленькими черными звездами) на глубине 30 км. Белая звезда означает принятое положение реконструированного точечного источника; рядом показан его механизм очага. Квадратами показаны GPS-станции VKI, ES1, KBG, KLU, TIG, MA1, PETP – опорная станция.

емые смещения соответствуют модели субдукции Тихоокеанской плиты под Камчатку [13].

В связи с КЗ по данным наблюдений на сети GPS-станций зарегистрированы пред-, ко- и постсейсмические горизонтальные деформации на расстояниях до сотен км от эпицентра [3, 13, 20]. В течение 15–20 суток до КЗ регистрировались перемещения ближайших к очагу станций с заметными амплитудами (рис. 4), выделенные авторами [3, 13, 20] в деформационный предвестник этого события. Перемещения GPS-станций происходили синхронно с развитием гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в двух скважинах (рис. 1б).

В [3, 20] представлены результаты моделирования статического перемещения GPS-станций от точечного сдвигового источника общего вида в упругом полупространстве на стадии подготовки КЗ (рис. 4). Было показано, что моментная магнитуда сдвигового источника составляла  $M_w = 7.7$ , а его нормализованный тензор близок к двойному диполю (рис. 4, табл. 1). Такие предсейсмические движения авторы [3, 20] объясняют развитием “медленного землетрясения”, расположенного примерно в центре

форшокового роя у северо-восточного края очага КЗ (рис. 1а, 4). По результатам моделирования также сделан вывод о преимущественно упругом характере наблюдаемых движений без признаков дилатансионной составляющей.

Следует отметить, что выполненная в [3, 20] оценка полного сейсмического момента, связанного с суммарными перемещениями GPS-станций с 15 ноября по 25 декабря 1997 г., соответствует моментной магнитуде  $M_w = 8$ . При этом главный вклад (~45–50 %) дал постсейсмический сигнал; косейсмическое движение составляло около 35–40 %, на предсейсмический сигнал приходится не более 10–20 %.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

*О синхронном проявлении геодезического и гидрогеодинамического предвестников КЗ.* На рис. 1б приводится сопоставление перемещений GPS-станций относительно станции РЕТР и изменений уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 в течение 2.5 мес. до КЗ. Предсейсмические деформации, особенно ярко проявившиеся в перемещениях ближайших к эпицентру станций KLU, ES1 и KBG, возникли за 1–0.5 мес. до землетрясения и отражали предшествующие этому землетрясению преимущественно асейсмические движения в области очага.

Примерно за три недели до КЗ во время развития предсейсмических движений в изменениях уровня воды в двух скважинах, удаленных на 320 км от эпицентра, зарегистрированы бухтообразные понижения (рис. 1б), выделенные в гидрогеодинамический предвестник этого события. В работе [4] такие вариации уровня воды объясняются квазиупругой деформацией расширения водовмещающих пород вследствие развития предсейсмических движений в области очага.

Таким образом, синхронное проявление предсейсмических перемещений GPS-станций Камчатской сети и гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровней воды в скв. ЮЗ-5 и Е-1 может рассматриваться в качестве показателя связи этих явлений (рис. 1б).

*О точности оценок величин предсейсмической деформации по уровнемерным данным.* Для скв. ЮЗ-5 применялась модель упругого отклика уровня воды на объемную деформацию водовмещающих пород в диапазоне периодов проявления статически изолированных условий в системе “скважина – резервуар”. Такая модель подтверждается результатами барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды, согласованностью оценок косейсмической деформации по уровнемерным данным и по

модели протяженного источника в однородном упругом полупространстве [12], а также правдоподобными оценками величин упругих параметров водовмещающих пород. Поэтому понижение уровня воды в скв. ЮЗ-5 перед КЗ вполне могло соответствовать неискаженной упругой реакции порового давления на предсейсмическую деформацию расширения водовмещающих пород.

По амплитуде понижения уровня воды и величине его приливной чувствительности  $A_v$  по (1) определена величина предсейсмической объемной деформации водовмещающих пород в районе скв. ЮЗ-5  $D_t = (0.68 \pm 0.04) \cdot 10^{-7} \approx 0.7 \cdot 10^{-7}$ . Точность величины  $D_t$  определяется, в первую очередь, точностью величины приливной чувствительности уровня воды  $A_v$ , которая оценивалась по отношению к теоретической приливной деформации в районе скважины по модели приливного деформирования Земли СТЕД [27]. По экспериментальным данным известно, что в прибрежных районах различие между теоретическими и фактическими величинами приливной деформации может достигать первых десятков процентов вследствие влияния океанической нагрузки и локальных неоднородностей строения земной коры.

Для проверки полученной величины  $D_t$  выполнен расчет объемной деформации  $\Delta \epsilon$  по (7) с использованием величин понижения уровня воды  $\Delta h = -0.11$  м,  $G$  и  $V$  из табл. 3 и  $\nu_u = 0.3$ . В этом случае величина объемной предсейсмической деформации на стадии подготовки КЗ составляет  $\Delta \epsilon = 0.6 \cdot 10^{-7}$ . Близкие значения  $D_t$  и  $\Delta \epsilon$  указывают на правильность оцененных упругих параметров резервуара и на внутреннюю согласованность используемой модели для скв. ЮЗ-5.

Величина предсейсмической деформации в районе скв. Е1  $\Delta \epsilon \approx 0.8 \cdot 10^{-7}$  согласуется по порядку величин с оценкой для района скв. ЮЗ-5 (скважины расположены на расстоянии 11 км друг от друга). Вместе с тем, эта величина имеет оценочный характер, т. к. при ее получении закладывался ряд правдоподобных предположений, в частности, о величинах пористости водовмещающих пород, сжимаемостей скелета и твердой фазы скелета, величинах дренированного и недренированного коэффициентов Пуассона. Использование моделирования отклика уровня на его искусственное возмущение – спуск датчика акустической эмиссии в ствол скважины – позволило получить приблизительную оценку величины сжимаемости подземной воды  $\beta_r$ . Представленные методические приемы демонстрируют возможность получения оценок предсейсмической деформации не только по данным наблюдений на скв. Е-1, но и на других подобных скважинах, контролирующих газосодержащие водо-

вмещающие породы, в изменениях уровня в которых не проявляются приливные вариации.

С использованием формулы (7) и оцененных параметров водовмещающих пород (табл. 3) получен диапазон величин деформометрической чувствительности уровня воды в скв. Е-1  $A_v = 0.007-0.030$  см/10<sup>-9</sup>, в среднем – 0.016 см/10<sup>-9</sup>.

В заключение следует отметить, что в гидрогеохимическом режиме четырех глубоких самоизливающихся скважин предвестники в форме аномальных изменений химического состава воды проявлялись в течение нескольких месяцев перед КЗ [7, 18, 19]. Это указывает на предшествующее этому землетрясению существенное изменение условий смешивания контрастных по химическому составу подземных вод в питающих водоносных системах. Как указывалось в [6, 7], такие проявления гидрогеохимических предвестников могли быть связаны с длительной (месяцы) эволюцией приповерхностной зоны трещинной дилатансии в водовмещающих породах в процессе подготовки КЗ. При этом аномальные перемещения GPS-станций на этой стадии подготовки землетрясения не регистрировались.

Пример КЗ показывает, что на стадии его подготовки проявлялись два типа процессов в геологической среде в континентальных районах Камчатки – относительно длительное развитие трещинной дилатансии в горных породах и более кратковременное, порядка первых десятков суток, их квазиупругое деформирование. При этом гидрогеохимический режим самоизливающихся скважин является более чувствительным к первому из указанных процессов, а гидрогеодинамический режим пьезометрических скважин, вскрывающих напорные подземные воды, более чувствителен ко второму процессу, который развивался на относительно краткосрочной стадии подготовки КЗ.

Пример КЗ также показывает необходимость комплексирования различных видов наблюдений, ориентированных на диагностику предвестников сильных землетрясений, обусловленных различием двух возможных процессов, развивающихся на средне-краткосрочных стадиях их подготовки.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за внимательное ознакомление с рукописью статьи и ценные замечания, направленные на ее улучшение.

По мнению одного из рецензентов, применение теории пороупругости для оценок упругих параметров и пористости водовмещающих пород, а также количественные оценки величин предсейсмической

объемной деформации на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения являются не вполне обоснованными при длительных гидрогеодинамических процессах, сопровождающихся упругой неустановившейся фильтрацией. Вместе с тем, рецензентом не приводятся критерии определения указанной им верхней границы применимости теории пороупругости (1 сут). В настоящей работе для определения верхней границы статически изолированных условий в системе “скважина – водовмещающая порода” и, соответственно, применимости теории пороупругости для наблюдаемых изменений уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 используются результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления. При этом вариации атмосферного давления рассматриваются в качестве природного зондирующего сигнала состояния системы “скважина – водовмещающая порода” в широком диапазоне периодов – от часов до сотен суток.

#### 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. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 8. № 2. С. 112–119.
3. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левин В.Е. и др. Предварительный анализ перемещений станций GPS на Камчатке: скорости плит и геодезический предвестник землетрясения // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 82–94.
4. 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.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
6. Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 7. № 1. С. 50–66.
7. Копылова Г.Н. О связи режима подземных вод с сейсмичностью и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений // Разведка и охрана недр. 2008. № 7. С. 37–45.
8. Копылова Г.Н. Оценка информативности равномерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С. 56–68.
9. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
10. Копылова Г.Н., Жаляева Ю.К. Прогнозы и предвестники

- Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. (по материалам работы Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности) // Проблемы сейсмичности Дальнего Востока. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 146–154.
11. Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М. Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75–83.
  12. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В. и др. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51–61.
  13. Левин В.Е. GPS мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах 1997–2007 гг. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 60–70.
  14. Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. с  $M_w = 7.8$ ,  $I_0 = 8$  (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251–271.
  15. Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 769 с.
  16. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
  17. Справочник по гидравлическим расчетам. М: Энергия, 1972. 312 с.
  18. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГАРФ, 1998. С. 134–147.
  19. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печ. двор, 2004. С. 96–112.
  20. Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E. et al. Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189–198.
  21. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824–1832.
  22. Igarashi G., Wakita H. Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96, N B3. P. 4269–4278.
  23. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
  24. Rojstaczer S., Agnew D.S. The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403–12411.
  25. Skempton A.W. The pore-pressure coefficients A and B // Geotechnique. 1954. V. 4. P. 143–147.
  26. Van der Kamp G., Gale L.E. Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // Water Resour. Res. 1983. V. 19. P. 538–544.
  27. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. N 118. P. 8719–8721.

*Рекомендована к печати Б.В. Левиным*

*G.N. Kopylova, S.V. Boldina*

### **On the mechanism of a hydrogeodynamic precursor of the Kronotsky earthquake, December 5, 1997, $M_w = 7.8$**

Fall of water table with amplitudes 11 and 1 cm were registered in the wells UZ-5 and E-1, Kamchatka, within three weeks before the 5<sup>th</sup> December, 1997 Kronotsky earthquake,  $M_w = 7.8$ . Such decreases of water level defined as hydrogeodynamic precursor of the earthquake, developed synchronously with horizontal displacements of the GPS-stations located at intervals up to the first hundreds km from the future seismic focus. The mechanism of the formation of the hydrogeodynamic Kronotsky earthquake precursor is discussed with application of the model of the elastic response of water level to the seismotectonic deformation of water-bearing rocks. It was shown that the fall of water table in both wells can be explained by undistorted response of pore pressure to a quasi-elastic volume deformation of the water-bearing rocks as a result of pre-seismic movements at the stage of the Kronotsky earthquake preparation. From the level meter observations in the areas of the wells, the estimated values of pre-seismic expansion of the water-bearing rocks are  $D_t = (0.6–0.8) 10^{-7}$ .

**Keywords:** Kronotsky earthquake, well, water-bearing rock, water table, tidal sensitivity, deformation, seismic focus, precursor.