

УДК 556.33:550.348

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КРОНОЦКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНЕ ЮЗ-5, КАМЧАТКА

© 2008 С.В. Болдина, Г.Н. Копылова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: boldina@emsd.ru, gala@emsd.ru*

На примере Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$, очаг которого располагался на расстоянии 320-236 км от скважины ЮЗ-5, Камчатка, представлен способ точечной оценки косейсмической объемной деформации по амплитуде скачка уровня воды во время землетрясения и величине его приливной чувствительности. Получено хорошее соответствие величины амплитуды и знака косейсмической деформации (расширение) по данным уровнемерных наблюдений и по модели точечного источника дислокации в однородной упругой среде с параметрами тензора сейсмического момента (СМТ) Кроноцкого землетрясения.

Ключевые слова: амплитуда, деформация, землетрясение, косейсмический, Кроноцкое, сейсмический, скачок, скважина.

ВВЕДЕНИЕ

Уровнемерные наблюдения в скважинах являются одним из способов геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов и поиска предвестников землетрясений. Чувствительность уровня воды к изменениям напряженно-деформированного состояния среды определяется процессами деформирования водовмещающих пород и соответствующими вариациями порового давления при подготовке землетрясений, образовании сейсмодислокаций и распространении сейсмических волн. Эффекты воздействия землетрясений на состояние системы скважина-резервуар могут проявляться в различных типах вариаций уровня воды, соответствующих статическому изменению напряженного состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах, прохождению сейсмических волн и процессам подготовки землетрясений (Копылова, 2006).

При образовании разрывов в очагах сильных землетрясений происходит изменение статического напряженного состояния резервуаров напорных подземных вод на расстояниях до десятков-первых сотен км. Такой эффект проявляется в косейсмических скачках повышения и понижения уровня воды в скважинах, которые регистрируются непосредственно во время

образования разрыва и фиксируют реакцию порового давления на упругое деформирование водовмещающих пород. Как было показано в работе (Wakita, 1975), распределение по площади зон косейсмического сжатия и расширения и, соответственно, зон проявления скачков повышения и понижения уровня вод в скважинах, определяется механизмом очага землетрясения. Амплитуды косейсмических скачков обычно составляют десятые доли-первые десятки см и определяются величиной косейсмической деформации водовмещающих пород и упругими параметрами резервуара подземных вод.

Проявление косейсмических скачков, а также наличие приливных вариаций уровня воды в отдельной скважине, могут рассматриваться в качестве показателей ее деформометрической чувствительности и информативности при проведении геофизического мониторинга сейсмоактивных территорий, направленного на поиск предвестников землетрясений (Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989).

Необходимым условием записи косейсмических скачков является дискретность регистрации уровня воды не более 10-15 минут. При регистрации уровня воды с большей дискретностью (например, 1 ч) косейсмические скачки не вы-

являются из-за их малых амплитуд и коротких длительностей развития, или их маскировки за счет наложения более длительных и амплитудных эффектов прохождения сейсмических волн, связанных, в основном, с изменением водопроницаемых свойств системы скважина-резервуар. Последнее обстоятельство, т. е. практически одновременное воздействие двух факторов сейсмичности на состояние системы скважина-резервуар: изменения статического напряженного состояния резервуаров подземных вод и динамическое воздействие сейсмических волн, осложняет выделение косейсмических скачков и часто приводит к неверным выводам в отношении их амплитуд, времени проявления и, соответственно, их связи с параметрами очагов землетрясений.

Фактор приливного воздействия на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры при гравитационном взаимодействии в системе Земля-Луна-Солнце достаточно хорошо изучен и рассчитывается для произвольных точек поверхности Земли с точностью не хуже 50% по отношению к данным инструментальных измерений (Мельхиор, 1968). Некоторое несоответствие теоретических оценок и данных инструментальных измерений приливных деформаций на поверхности Земли может быть вызвано наличием локальных гравитационных неоднородностей в точках измерений, а также влиянием океанического прилива, в составе которого присутствуют волны, аналогичные земноприливным по периоду, но отличающиеся по фазе.

Количественная оценка параметров отклика уровня воды в скважине на приливное воздействие: амплитуд отдельных приливных волн и разностей фаз между фазами приливных волн в изменениях уровня воды и соответствующими фазами приливного потенциала, позволяет получить величину приливной чувствительности уровня воды, которая может использоваться при оценке косейсмической деформации в районе скважины в качестве нормирующего коэффициента (Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988). В случае проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине, когда фильтрацией и водообменом между скважиной и резервуаром подземных вод можно пренебречь (Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989), величина приливной чувствительности строго определяется упругими параметрами резервуара (Копылова, Болдина, 2006; Rojstaczer, Agnew, 1989). Если приливной отклик уровня воды и амплитуды косейсмических скачков искажаются течением воды между скважиной и резервуаром, то в этом случае косейсмическая

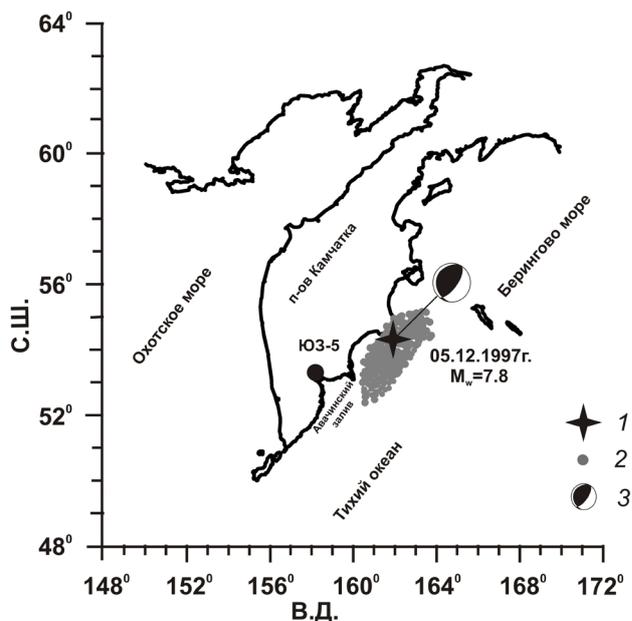


Рис.1. Схема расположения скважины ЮЗ-5, очага Кроноцкого землетрясения 05.12.1997г., $M_w = 7.8$ по афтершокам первых суток и его СМТ механизм. 1 – эпицентр Кроноцкого землетрясения; 2 – афтершоки Кроноцкого землетрясения с 5 по 20 декабря 1997 г. с $M \geq 4$; 3 – диаграмма механизма СМТ Кроноцкого землетрясения.

деформация оценивается приблизительно.

Скважина ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., глубина 800 м, уровень воды находится на глубине 1.5 м) расположена в 15-25 км от побережья Авачинского залива (рис. 1). В этой скважине, вскрывающей в интервале 310-800 м напорные подземные воды в метаморфизованных алевролитах и сланцах верхнемелового возраста, с сентября 1997 г. осуществляется регистрация уровня воды и атмосферного давления с дискретностью 10 минут (Копылова, 2006). Наблюдения проводятся Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). В течение всего времени наблюдений точность регистрации вариаций уровня составляла ± 0.1 см, а атмосферного давления – ± 0.2 гПа.

В скважине ЮЗ-5 по реакции уровня воды на атмосферное давление обнаружен статически изолированный отклик воды на изменения напряженно-деформированного состояния среды в диапазоне периодов часы – первые десятки суток. Для нее также установлен неискаженный приливной отклик уровня воды на периодах приливных волн полусуточной и суточной групп (Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006).

В 1997-2004 гг. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 зарегистрированы шесть косейсмических скачков с амплитудами 0.25-12.0 см во время местных землетрясений с $M = 4.6-7.8$ на расстояниях $R = 128-316$ км до

инструментальных гипоцентров. Скачки уровня регистрировались, в основном, в течение 10-минутного интервала, включающего момент землетрясения. В четырех случаях наблюдалось понижение уровня воды, в трех случаях – его повышение (Копылова, 2006). Максимальная амплитуда косейсмического скачка понижения уровня воды ($\Delta h = -12$ см) наблюдалась во время Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (рис. 1, 2). Следует отметить, что в результате этого землетрясения в изменениях уровня воды были выявлены три последовательно проявившихся типа вариаций, соответствующих гидрогеодинамическому предвестнику, косейсмическому скачку и длительному постсейсмическому понижению и восстановлению (Копылова, 2006).

В настоящей работе проводится оценка величины объемной косейсмической деформации водовмещающих пород в районе скважины ЮЗ-5 при Кроноцком землетрясении по амплитуде косейсмического скачка с использованием расчетной величины приливной чувствительности уровня воды, полученной из приливного анализа вариаций уровня воды (Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006). Для сравнения выполнена теоретическая оценка объемной косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 при Кроноцком землетрясении, полученная на основе решения уравнения для двойной пары сил в бесконечной однородной среде (Аки, Ричардс, 1983). Соответствующие расчеты выполнены к. ф.-м. н. В.М. Павловым, КФ ГС РАН. Обе точечные оценки объемной деформации согласуются по характеру (расширение) и по амплитуде (единицы $\times 10^{-8}$).

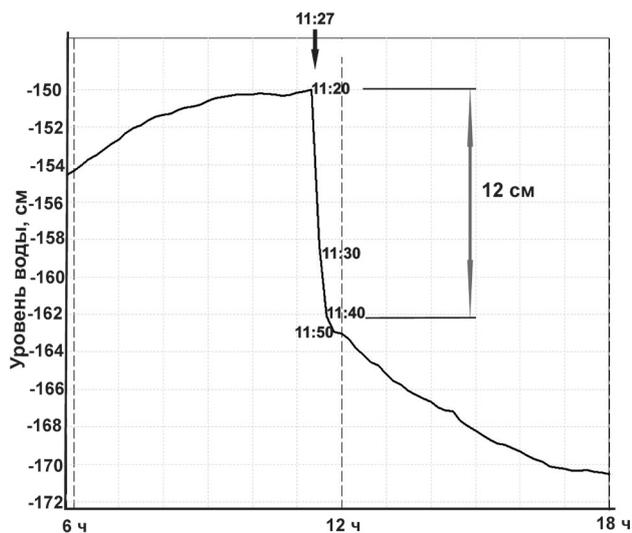


Рис. 2. Косейсмический скачок уровня воды с амплитудой 12 см в скважине ЮЗ-5 во время Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ по данным 10-минутной регистрации. Момент Кроноцкого землетрясения (11 ч 27 мин) показан черной стрелкой.

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПО ДАННЫМ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 3а представлены исходные 10-минутные данные регистрации уровня воды и атмосферного давления во время Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. Видно, что косейсмический скачок понижения с амплитудой 12 см (рис. 2) сильно маскируется барометрическими, приливными вариациями уровня, а также развитием длительного интенсивного постсейсмического понижения, последовавшего непосредственно после скачка.

На рис. 3б приводится фрагмент среднечасовых данных наблюдений, который исполь-

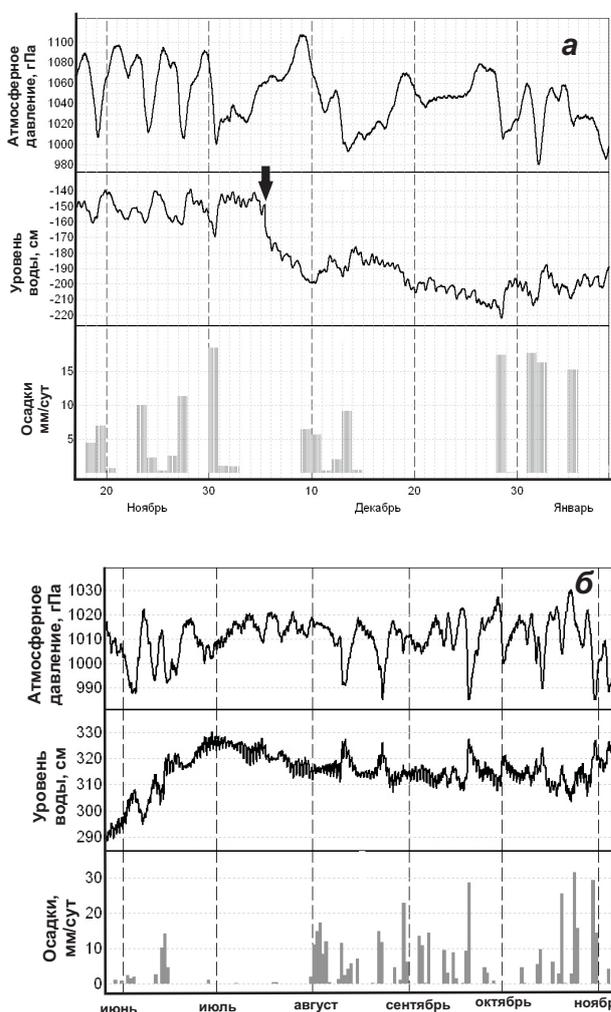


Рис. 3. Данные наблюдений за вариациями уровня воды и атмосферного давления на скважине ЮЗ-5 в сопоставлении с суточными суммами осадков на метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю окружающей среды: а – данные 10-минутной регистрации во время Кроноцкого землетрясения (показано черной стрелкой), 17.11.1997 г. – 8.01.1998 г.; б – среднечасовые данные наблюдений за атмосферным давлением и уровнем воды 26.05-5.11.2003 г.

зовался для оценки параметров приливного отклика уровня воды. В течение времени с 26.05 по 5.11.2003 г. в изменениях уровня воды проявлялись только барометрические и приливные вариации, сезонный тренд, а также слабая реакция на выпадение осадков. Косейсмические скачки или другие вариации уровня воды, вызванные землетрясениями, в течение этого периода не проявлялись.

Барометрический отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне периодов от 6 ч до первых десятков суток характеризуется постоянной величиной барометрической эффективности $E_b = \Delta h_a / \Delta p_a = 0.39 \text{ см/гПа}$, где Δh_a – амплитуда барометрических вариаций уровня воды, см; Δp_a – амплитуда изменения атмосферного давления, гПа. Разность фаз между вариациями уровня воды и атмосферного давления в этом диапазоне периодов близка к 180° . Это указывает на хорошую изоляцию резервуара перекрывающими породами и на отсутствие вертикальных перетоков подземных вод, искажающих барометрический отклик (Болдина, Копылова, 2006; Копылова, Болдина, 2006; Roeloffs, 1988; Rojstaczer, 1988; Rojstaczer, Agnew, 1989). Возрастание величины E_b от 0.2 до 0.39 см/гПа на периодах 2-6 ч обусловлено инерционным эффектом течения воды в скважину и из скважины (Болдина, Копылова, 2006), а также, возможно, нестационарностью процесса формирования барометрического отклика в высокочастотной области.

На рис. 4а приводится периодограмма вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 в диапазоне приливных периодов 11-27 ч. В изменениях уровня воды хорошо выделяются волны S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 (Мельхиор, 1968) с амплитудами 1.4-0.2 см.

Оценка параметров приливного отклика уровня воды (амплитуд приливных волн, амплитудных факторов, равных отношению выделенных амплитуд отдельных волн в изменениях уровня воды к соответствующим величинам теоретической объемной деформации; разности фаз между фазами приливных волн в изменениях уровня и соответствующими фазами приливного потенциала) проводилась с использованием программы ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994). Результаты анализа представлены в табл. 1. Величины приливных параметров по наиболее мощной волне P_1S_1 (ее период составляет 23.93 ч) не учитывались из-за зашумленности вариаций уровня воды действием метеофакторов на суточном периоде. Для 8-ми волн приливные параметры достаточно надежно определяются по равномерным данным при отношении сигнал/шум ≥ 10 (12-272). Величины амплитудных факторов для них находятся в диапазоне 0.138-0.216 см/ 10^{-9} . Различия в величинах амплитудных факторов

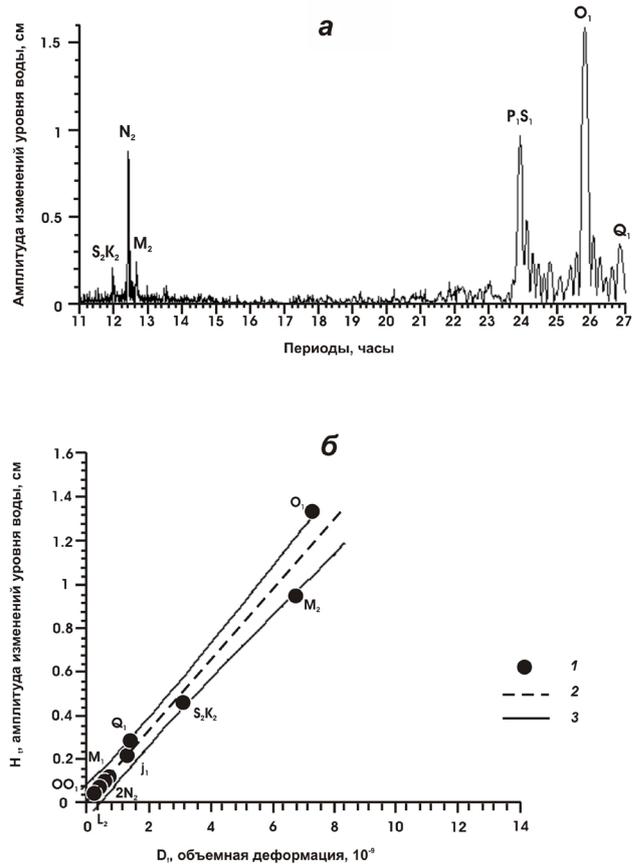


Рис. 4. Характеристика приливного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5: *a* – периодограмма вариаций уровня воды в диапазоне приливных периодов 11-27 ч; S_2K_2 , M_2 , N_2 , P_1S_1 , O_1 , Q_1 – приливные волны по (Мельхиор, 1968); *б* – зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от амплитуд приливной объемной деформации (табл. 1). 1 – приливные волны; 2 – тренд линейной зависимости выделенных амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды от соответствующих величин приливной объемной деформации при значении коэффициента корреляции $K = 0.98$; 3 – 95% доверительный интервал для линейной зависимости выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды и величин теоретической приливной деформации.

для отдельных волн могут быть вызваны особенностями формирования приливного отклика в различных частотных диапазонах, а также некоторым искажением приливных амплитуд в изменениях уровня воды при воздействии океанического прилива, в котором присутствуют волны, имеющие такие же периоды, но отличающиеся по фазе (Копылова, Болдина, 2006). На некоторое влияние океанического прилива, в частности, указывают значения разности фаз между приливными вариациями уровня воды и соответствующими компонентами теоретического земного прилива, составляющие $-154^\circ \div -179^\circ$, и отличающиеся в среднем от «идеального» значения (-180°) на 10° .

ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ КРОНОЦКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Таблица 1. Результаты приливного анализа вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по программе ETERNA 3.0 (Wenzel, 1994)

Волна	Амплитуда, объемной деформации D_t , ед. $\times 10^{-9}$	Амплитуда уровня воды H_t , см	Сигнал/шум	Амплитудный фактор, см/ 10^{-9}	Фазовый сдвиг, град.
Q_1	1.40	0.276	36	0.197 \pm 0.005	-166 \pm 2
O_1	7.31	1.338	174	0.183 \pm 0.001	-166 \pm 0.3
M_1	0.57	0.102	13	0.178 \pm 0.013	-168 \pm 4
P_1S_1	10.28	1.161	151	0.113 \pm 0.001	-170 \pm 0.4
J_1	0.57	0.094	12	0.163 \pm 0.013	-179 \pm 4
OO_1	0.31	0.053	7	0.169 \pm 0.024	-174 \pm 8
$2N_2$	0.21	0.045	13	0.216 \pm 0.017	-177 \pm 4
N_2	1.30	0.220	64	0.170 \pm 0.003	-177 \pm 1
M_2	6.78	0.940	272	0.138 \pm 0.001	-172 \pm 0.2
L_2	0.19	0.028	8	0.147 \pm 0.018	-168 \pm 7
S_2K_2	3.16	0.457	132	0.145 \pm 0.001	-154 \pm 0.4
M_3	0.03	0.008	3	0.273 \pm 0.086	-138 \pm 18

Примечание. Жирным выделены волны, параметры которых определяются при отношении сигнал/шум ≥ 10 .

На рис. 4б приводится линейная зависимость выделенных амплитуд приливных волн в изменениях уровня воды H_t , см от теоретических амплитуд объемной деформации D_t , 10^{-9} по модели приливного потенциала CTED (Wenzel, 1994). Наблюдается тесная линейная связь между этими величинами, которая с оценкой 95%-го доверительного интервала имеет вид:

$$H_t = (0.161 \pm 0.008)D_t + (0.004 \pm 0.068). \quad (1)$$

Наклон линейной зависимости, связывающей выделенные амплитуды приливных изменений уровня и соответствующие величины объемной деформации $\Delta H_t / \Delta D_t = A_v$, составляет ≈ 0.161 см/ 10^{-9} . Эта величина представляется наиболее приемлемой в качестве характеристики приливной чувствительности A_v для скважины ЮЗ-5 во всем диапазоне приливных периодов.

По результатам кросс-спектрального анализа часовых вариаций уровня воды и атмосферного давления, приведенного в работе (Копылова, Болдина, 2006), установлено наличие статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 на изменение напряженно-деформированного состояния вскрытого резервуара в часовом-суточном диапазоне периодов. Статически изолированный отклик уровня воды характеризуется упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород, которая определяется, в основном, упругими параметрами контролируемого резервуара и не искажается течением воды. Поэтому в работе (Копылова, Болдина, 2006) предполагалось, что в диапазоне периодов часы-первые десятки суток скважина ЮЗ-5 будет работать как деформограф без существенных искажений. На больших периодах отклик уровня воды на изменение напряженно-деформированного состояния резервуара подземных вод может искажаться за счет

процессов фильтрации и сезонного изменения гидростатического напора.

Из предположения (Копылова, Болдина, 2006; Rojstaczer, 1988) о линейном характере связи между вариациями уровня воды и деформацией водовмещающих пород в диапазоне не менее трех порядков (10^{-9} - 10^{-7}) можно оценивать сейсмотектоническую деформацию водовмещающих пород по амплитудам изменения уровня воды во всем диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика по формуле:

$$D = -\Delta h / A_v, \quad (2)$$

где D – объемная деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению, отрицательное значение соответствует сжатию; Δh – амплитуда изменения уровня воды в см: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует понижению уровня воды; A_v – приливная чувствительность уровня воды в см/ 10^{-9} .

Точность регистрации вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 составляет 0.1 см, поэтому при величине $A_v = 0.161$ см/ 10^{-9} можно ожидать заметные изменения уровня воды при объемной деформации вскрытого резервуара с амплитудами не менее первых единиц $\times 10^{-9}$.

При Кроноцком землетрясении 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ наблюдался скачок понижения уровня воды, который фиксировался в течение двух 10-минутных интервалов регистрации. Его максимальная продолжительность составила примерно 13 минут (рис. 2). Амплитуда скачка Δh составила -12 см. В районе скважины ЮЗ-5 при Кроноцком землетрясении амплитуда косейсмической деформации по (2) с учетом 95%-ого доверительного интервала зависимости (1) составляет $D = (7.5 \pm 0.4) \times 10^{-8}$ (рис. 5). Характер деформации оценивался по направлению изменения уровня

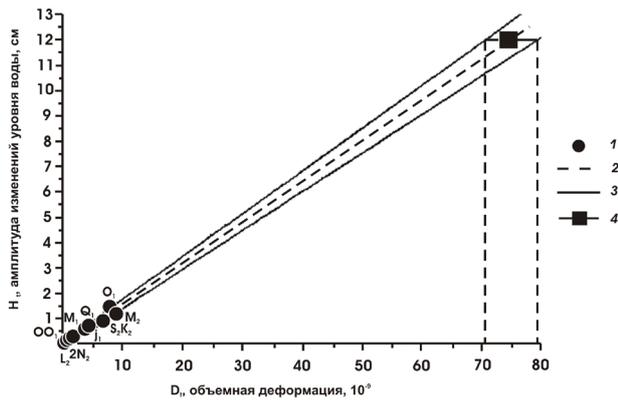


Рис. 5. Оценка величины косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 во время Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$. 1 – приливные волны, выделенные в изменениях уровня воды; 2 – тренд линейной зависимости между амплитудами выделенных приливных волн в изменениях уровня воды и соответствующими величинами теоретической объемной деформации; 3 – 95% доверительный интервал для зависимости выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды от величин теоретической объемной деформации; 4 – амплитуда косейсмического скачка уровня воды во время Кроноцкого землетрясения и соответствующая оценка косейсмической деформации.

воды: понижение уровня воды фиксировало деформацию объемного расширения резервуара подземных вод.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОСЕЙСМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ ЮЗ-5

Для проверки полученной по данным уровневых наблюдений величины косейсмической деформации при Кроноцком землетрясении в районе скважины ЮЗ-5 выполнена ее теоретическая оценка на основе решения уравнения для двойной пары сил в бесконечной однородной среде (Аки, Ричардс, 1983).

Если принять что среда однородная, изотропная и неограниченная по протяженности (параметры Ламе одинаковые), то формула для статической объемной деформации имеет вид:

$$\varepsilon = -\frac{2M_0}{\pi\rho c_p^2 r^3} \sum_{p,q=1}^3 M_{pq} \gamma_p \gamma_q, \quad (3)$$

где M_0 – скалярный сейсмический момент,

Таблица 2. Параметры очага Кроноцкого землетрясения (по данным каталога СМТ (<http://www.globalcmt.org/>))

Дата дд.мм.гг	Время чч:мм:сс	Магнитуда M_w	Положение центраида			Плоскости подвижки		Угол подвижки λ_s , градусы	Скалярный сейсмический момент M_0 , $H \times M \times 10^{20}$
			с.ш.	в.д.	Н, км	Азимут прости- рания φ_s , градусы	Угол падения δ , градусы		
05.12.97	11:27:21	7.8	54.31	161.91	33.6	202/39	23/68	74/97	5.32

ρ – плотность среды, c_p – скорость Р-волн, r – гипоцентральное расстояние, M_{pq} ($p, q = 1, 2, 3$) – компоненты единичного тензора сейсмического момента (механизм), γ_p ($p = 1, 2, 3$) – направляющие косинусы луча.

В работе использовался механизм тензора сейсмического момента Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$ из каталога СМТ (Centroid-Moment-Tensor (<http://www.globalcmt.org/>)), в котором приводятся решения для тензоров сейсмических моментов эквивалентных точечных источников. В табл. 2 приводятся параметры СМТ для Кроноцкого землетрясения: положение центраида, т. е. средней точки очага землетрясения, где помещается эквивалентный точечный источник; компоненты тензора сейсмического момента и наилучший двойной диполь, соответствующий этому тензору. Диполь включает скалярный момент и определяет механизм землетрясения, т. е. два варианта плоскости очага и направления подвижки. Ориентация плоскости задается двумя углами – азимутом простирания φ_s и углом падения δ , а направление подвижки – углом λ_s , т. е. углом в плоскости очага между направлением простирания и вектором подвижки, который отсчитывается от направления простирания против часовой стрелки. Диаграмма механизма СМТ Кроноцкого землетрясения приводится на рис. 1.

Расчет косейсмической объемной деформации при Кроноцком землетрясении по формуле (3) с использованием величин $\rho = 3 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 6.15 \times 10^3 \text{ м/с}$, $r = 236 \times 10^3 \text{ м}$ (расстояние от центраида до скважины), $M_0 = 5.32 \times 10^{20} \text{ Н}\cdot\text{м}$ и параметров СМТ (табл. 2), дает величину расширения в районе скважины ЮЗ-5 $\varepsilon = 2.64 \times 10^{-8}$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Точечные оценки косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 при Кроноцком землетрясении 5.12.1997 г., выполненные по данным уровневых наблюдений и по модели точечного источника дислокации в однородной бесконечной среде, дают непротиворечивый результат как по амплитуде деформации ($D = 7.50 \times 10^{-8}$ и $\varepsilon = 2.64 \times 10^{-8}$), так и по характеру деформации (расширение). Такое соответствие показывает, во-первых, что амплитуды ко-

сейсмических скачков уровня воды адекватно отражают косейсмическую деформацию водовмещающих пород и, во-вторых, они практически не искажаются инерционными процессами водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод. Это позволяет, в случае проявления косейсмических скачков, расширить диапазон проявления статически изолированного отклика уровня воды в скважине ЮЗ-5 в область малых периодов, составляющих минуты.

При этом следует учитывать различие между механизмами воздействия переменной атмосферной нагрузки и косейсмической деформации на изменения уровня воды. При воздействии атмосферного давления происходят квазипериодическое изменение вертикальной нагрузки на контролируемый скважиной резервуар подземных вод и соответствующие вариации порового давления в нем. При этом с ростом периода амплитуды вариаций атмосферного давления и изменений порового давления монотонно увеличиваются. На малых периодах, составляющих минуты-первые часы, отклик порового давления на атмосферную нагрузку является относительно слабым, и соответствующая реакция уровня воды в скважине, вследствие ненулевой массы воды в стволе, подавляется инерционным процессом водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод (Болдина, Копылова, 2006). В скважине ЮЗ-5 максимальная и постоянная величина амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды наблюдается лишь на периодах ≥ 6 ч.

При образовании разрыва в очаге сильного землетрясения перераспределение напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород происходит быстро и включает весь их объем. При этом изменение порового давления в резервуаре подземных вод (его уменьшение при расширении и рост при сжатии) мгновенно достигает максимального значения. В таком случае реакция уровня воды в скважине на импульс порового давления практически не искажается инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод, т. к. в это время весь контролируемый скважиной объем взаимосвязанных водовмещающих пород «работает» на максимальную отдачу или поглощение воды. Для этого в скважине ЮЗ-5 имеются благоприятные условия — длинный (490 м) открытый ствол, связывающий скважину и резервуар подземных вод, и большая поверхность связи ствола и водовмещающих пород (258.6 м²).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен новый способ точечной

оценки величины косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений на примере регистрации косейсмического скачка уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$. Предложенный способ оценки величины косейсмической деформации водовмещающих пород основывается на результатах комплексного анализа барометрического и приливного откликов уровня воды в скважине и на данных по амплитудам косейсмических скачков, определяемых при интервале дискретизации данных регистрации уровня воды не более 10 мин.

Анализ барометрической реакции уровня воды позволил определить наличие и оценить частотный диапазон проявления неискаженного статически изолированного *барометрического* отклика уровня воды на изменения напряженно-деформированного состояния среды. Регистрация косейсмических скачков уровня воды в скважине при местных землетрясениях явилась показателем статически изолированных условий в резервуаре на минутных периодах при образовании сейсмических разрывов и импульсном изменении напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород.

По данным приливного анализа вариаций уровня воды получена величина приливной чувствительности вариаций уровня воды A_v , которая, совместно с данными по амплитудам косейсмических скачков Δh , используется в формуле (2) для оценки косейсмической деформации водовмещающих пород во время землетрясения D. Для района скважины ЮЗ-5 величина косейсмической деформации расширения во время Кроноцкого землетрясения по данным уровнемерных наблюдений составляет $D = (7.5 \pm 0.4) \times 10^{-8}$.

Использование расчетного способа оценки величины косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5, основанного на решении уравнения для двойной пары сил в бесконечной однородной среде (Аки, Ричардс, 1983), и данных СМТ для очага Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$, дало величину $\varepsilon = 2.64 \times 10^{-8}$. Обе оценки косейсмической деформации (D и ε) согласуются между собой по величине в пределах порядка и по характеру деформации (расширение). Различие этих величин, по-видимому, определяется точностью определения косейсмической деформации по обоим методам.

Полученное соответствие теоретической оценки косейсмической деформации и экспериментальной оценки по данным уровнемерных наблюдений подтверждает деформометрическую чувствительность уровня воды в скважине ЮЗ-5 и ее информативность для использования в системе геофизического мониторинга Камчатки.

Авторы выражают благодарность к. ф.-м. н. Павлову В.М. за предоставление расчетов величины косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 и полезное обсуждение работы.

Список литературы

- Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Т. 1. М: Мир, 1983. 520 с.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н.* Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 112-119.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17-28.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе скважина-резервуар (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Геофизический мониторинг Камчатки. Матер. научно-техн. конф., 17-18 января 2006 г., Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. В.Н. Чебров, Г.Н. Копылова. Петропавловск-Камчатский: Отгиск, 2006. С. 122-130.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- 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.
- 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.
- 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 // ВИМ. 1994. № 118. P. 8719-8721.

**THE ESTIMATION OF COSEISMIC STRAIN AT 5.12.1997
KRONOTSKY EARTHQUAKE $M_w = 7.8$ ON DATA OF WATER LEVEL
OBSERVATIONS ON THE WELL UZ-5, KAMCHATKA**

Boldina S.V., Kopylova G.N.

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

For the 5.12.1997 Kronotsky earthquake $M_w = 7.8$, located apart 320-236 km from the well UZ-5, Kamchatka, the point estimate method of the coseismic volumetric strain on amplitude of a water level step during earthquake and value of the tidal sensitivity of water level is represented. The close fit of magnitude of value and sign coseismic strain (expanding) on data of water level observations and on model of a point source of dislocation in homogeneous elastic medium with parameters CMT Kronotsky earthquake is obtained.