

**ОЦЕНКА СЕЙСМОПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ
УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СКВАЖИНЕ Е1, КАМЧАТКА
(ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ 1996-2007 гг.)**

Копылова Г.Н.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

Введение

Уровнемерные наблюдения на скважине Е1 (координаты 53.264° с.ш., 158.414° в.д., глубина 665 м, открытый интервал 625-645 м, уровень на глубине 29 м) [3, 4] проводятся Камчатской опытно-методической сейсмологической партией ГС РАН (с 1 апреля 2004 г. – Камчатский филиал ГС РАН) с 1987 г. по настоящее время. В течение всего времени наблюдений на скважине осуществлялась синхронная регистрация вариаций уровня воды и атмосферного давления с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений.

В 1987-1994 гг. для регистрации уровня воды использовался механический поплавковый самописец «Валдай», атмосферное давление измерялось с помощью барографа. Периодичность представления данных составляла 1 сутки. С 1996 г. на скважине проводится цифровая регистрация уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 10 мин. В 1996-2002 гг. для измерений уровня воды и атмосферного давления применялись дифференциальные датчики давления ДУ и ДА с частотным выходом и регистратор ГИП-3 с накоплением данных на твердотельную память. В мае 2001 г. на скважине установлен универсальный регистратор Кедр А2 (ООО «Полином», г. Хабаровск), оборудованный ультразвуковым датчиком уровня воды и датчиком атмосферного давления. Точность регистрации уровня воды составляет ± 0.2 см для датчика ДУ и ± 0.1 см для ультразвукового датчика. Съём и обработка данных проводятся один раз в две недели.

В работе [3] на примере данных наблюдений 1987-1998 гг. показано, что при возникновении землетрясений с $M = 6-7$ на расстояниях 100-300 км от скважины, в изменениях уровня воды проявляются однотипные сопутствующие (постсейсмические) и предшествующие (предсейсмические) вариации. После землетрясений уровень воды всегда плавно повышается. Перед землетрясениями наблюдается понижение уровня воды с повышенной скоростью, составляющей ≤ -13 мм/3 недели (≤ -0.062 см/сут). Ретроспективная оценка эффективности выявленного «тревожного признака» по [1] составила $I = 2.7$ при прогнозе землетрясений с $M \geq 6.6$. При снижении порога прогнозируемой магнитуды землетрясений до 5 величина I понижалась до 1.8. Продолжительность проявления «тревожного признака» перед землетрясениями изменялась от 3 недель до 7 месяцев, составляя в среднем 3.4 месяца или ~ 100 суток. Следует отметить, что непосредственно перед сильнейшим Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г., $M = 7.8$, произошедшим на расстоянии 310 км от скважины, «тревожный признак» в форме продолжительного понижения уровня воды с повышенной скоростью не проявлялся.

По результатам наблюдений 1987-1998 гг. предполагалось, что использование «тревожного признака» в изменениях уровня воды в скважине Е1 может быть полезным в комплексе с другими прогностическими данными для оценки времени возникновения относительно сильных землетрясений с $M \geq 6.6$ [3]. В течение 2002 г. – настоящее время осуществляется пробная оценка сейсмической опасности для района г. Петропавловска-Камчатского по данным наблюдений на скважине Е1 с предоставлением заключений в Камчатское отделение Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений с периодичностью один раз в две недели. По данным наблюдений на скважине Е1 в 2003-2007 гг. с использованием цифровой прецизионной аппаратуры было обнаружено, что «тревожный признак» в форме увеличения скорости понижения уровня воды может проявляться в течение суток-недель перед землетрясениями с M порядка 5-5.5, которые являются достаточно частыми событиями в пределах участка сейсмофокальной зоны, примыкающего к району г. Петропавловска-Камчатского. Проявление «тревожного признака» перед относительно слабыми землетрясениями затрудняет выдачу обоснованных заключений о возможности возникновения сильного ($M \geq 6.6$) землетрясения. Поэтому необходимо выполнить уточнение эффективности использования «тревожного признака» для прогноза землетрясений в широком диапазоне энергетических параметров и более детально изучить его свойства. В настоящей работе проводится оценка сейсмопрогностической эффективности использования

«тревожного признака» в изменениях уровня воды в скважине Е1 по данным наблюдений в 1996-2007 гг., и анализируется зависимость его проявления от параметров произошедших землетрясений.

Методика исследований

Данные синхронной регистрации уровня воды и атмосферного давления с 23 октября 1996 г. по 30 мая 2007 г. по техническим причинам представляют шесть фрагментов длительностью 186-800 суток. Общая длительность всех шести фрагментов составляет 2 224 суток. Для каждого фрагмента данных выполнялась компенсация баровариаций в изменениях уровня воды и приведение компенсированных рядов к частоте дискретизации 1 сутки. Затем производился переход к первым разностям. Получаемые временные ряды имеют размерность см/сутки и показывают вариации скорости изменения уровня воды за сутки. При развитии интенсивного положительного тренда в изменениях уровня воды, как это имело место, например, в течение шестого фрагмента, дополнительно проводилось вычитание из исходного ряда суточных скоростей их среднего значения. Затем временные ряды суточных скоростей изменения уровня воды сопоставлялись с моментами землетрясений с $K_s \geq 12.5$ ($M \geq 5.0$), произошедших на гипоцентральных расстояниях до 350 км от скважины. В случае возникновения роевых последовательностей землетрясений, развивающихся в течение первых суток, они объединялись в одно сейсмическое событие с максимальной энергетической характеристикой землетрясения в рое. При возникновении двух землетрясений с $K_s \geq 12.5$ в течение первых суток они также рассматривались как одиночное сейсмическое событие, которому присваивались параметры землетрясения с большей энергетической характеристикой.

В качестве «тревожного признака» принималось понижение уровня воды со скоростью ≤ -0.07 см/сут в течение не менее 5 суток. Если во время развития или после окончания развития «признака» в течение не более 30 суток происходило землетрясение, то оно сопоставлялось с соответствующим эпизодом проявления «признака». В других случаях понижение уровня воды со скоростью ≤ -0.07 см/сут в течение не менее 5 суток относилось к «ложной тревоге».

В качестве параметров, характеризующих «признак» перед конкретным землетрясением, рассматривались: время его проявления T_p , заблаговременность T_a ; экстремальная амплитуда A , соответствующая максимальной скорости понижения уровня воды во время проявления «признака»; время от момента проявления экстремальной амплитуды A до возникновения землетрясения T_z и время от окончания «признака» до землетрясения dT (рис. 1). В качестве характеристик сейсмических событий принимались магнитуда M , гипоцентральное расстояние R ; интенсивность сейсмического воздействия M/IgR и местоположение эпицентра. Результаты сопоставления двадцати сейсмических событий, произошедших за время наблюдений, с вариациями скорости изменения уровня воды представлены в таблице 1.

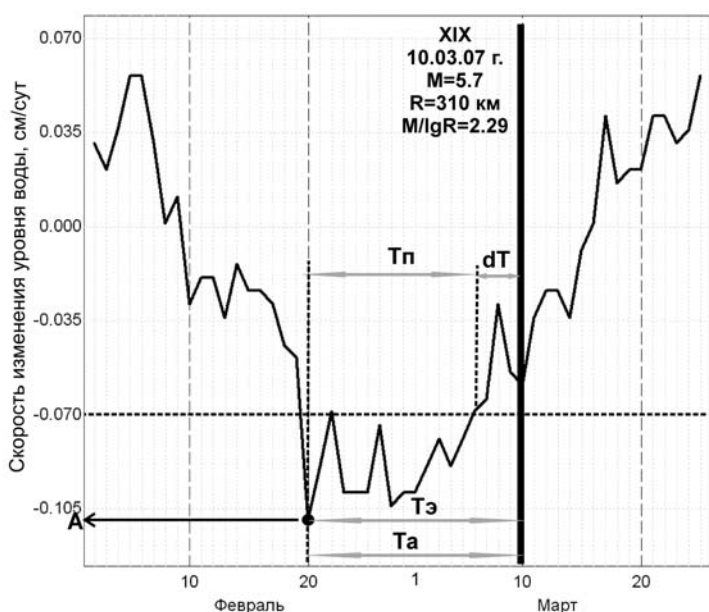


Рис. 1. Пример проявления «тревожного признака» в изменениях уровня воды в скважине Е1 в связи с сейсмическим событием XIX (см. табл. 1). T_p – время проявления «признака», T_a – заблаговременность проявления «признака», A – амплитуда, T_z – время от момента максимальной скорости понижения уровня воды во время развития «признака» до землетрясения, dT – время от окончания «признака» до землетрясения ($dT = T_a - T_p$). Пунктирной линией выделено пороговое значение скорости понижения уровня воды -0.07 см/сут.

Оценка информативности «признака» для каждого фрагмента и всего периода наблюдений проводилась по формуле:

$$I = (m/n)/(\tau/t),$$

где n – число произошедших сейсмических событий, m – число сейсмических событий, перед которыми проявлялся «признак»; τ – суммарное количество суток, в течение которых

Таблица 1. Сопоставление сейсмических событий и проявлений «тревожного признака» в изменениях уровня воды в скважине Е1 (по данным шести фрагментов непрерывных наблюдений в 1996-2007 гг.)

Событие	Дата ггммдд	Координаты, град.		М	R, км	M/lgR	Наличие «тревожного признака» и его параметры				
		с. ш.	в. д.				да/нет	Тп, сут	Та, сут	А, см/сут	Тэ, сут
Фрагмент 1: 23.10.1996 г. – 31.12.1998 г., t = 800сут											
I	971205	54.64	162.55	7.8	307	3.14	нет?	100?	367?	-0.21?	258?
II	980304	53.10	160.21	5.5	129	2.60	нет	-	-	-	-
III	980601	52.81	160.37	6.9	140	3.18	да	48	50	-0.16	12
IV	980830	53.56	162.09	5.2	244	2.18	да	13	28	-0.12	18
Фрагмент 2: 16.10.2002 г. – 29.04.2003 г., t = 196 сут											
V	030315	52.15	160.66	6.0	190	2.63	да	35	57	-0.15	36
Фрагмент 3: 26.06.2003 г. - 22.03.2005 г., t = 636 сут											
VI	030812	50.97	159.20	5.1	260	2.11	да	17	32	-0.09	22
VII	031107	50.79	157.50	5.5	287	2.46	нет	-	-	-	-
VIII	040320	53.74	160.74	5.8	162	2.62	да	21	20	-0.16	13
IX	040414	55.11	162.82	6.2	351	2.54	нет	-	-	-	-
X	040610	55.55	160.67	6.9	352	2.71	да	32	48	-0.12	43
XI	040804	52.24	159.84	5.6	146	2.59	да	7	9	-0.07	8
XII	041116	52.96	160.45	5.5	141	2.56	да	13	27	-0.08	17
Фрагмент 4: 28.04.2005 г. – 28.11.2005 г., t = 215 сут											
XIII	050726	52.74	160.29	5.8	215	2.49	да	6	11	-0.09	9
XIV	051108	52.57	159.29	5.2	106	2.57	да	6	6	-0.09	6
Фрагмент 5: 6.02.2006 г. – 10.08.2006 г., t = 186 сут											
XV	060302	52.42	159.19	5.0	112	2.44	да	27	19	-0.12	2
XVI	060522	54.09	159.06	6.2	229	2.63	да	25	52	-0.20	39
XVII	060731	51.63	159.72	5.3	200	2.30	нет	-	-	-	-
Фрагмент 6: 21.11.2006 г. – 30.05.2007 г., t = 191 сут											
XVIII	061209	52.60	160.72	5.0	168	2.25	-	-	-	-	-
XIX	070310	55.15	161.93	5.7	310	2.29	да	15	19	-0.11	19
XX	070530	51.89	157.90	6.1	203	2.64	да	34	56	-0.13	50

скорость понижения уровня воды составляла ≤ -0.07 см/сут; t – общее время наблюдений в сутках. Величина m/n характеризует вероятность связи «признака» и произошедших землетрясений. Величина τ/t показывает долю суммарного времени проявления «признака» по отношению к общему времени наблюдений, т. е. условную вероятность случайного совпадения «признака» и сейсмических событий. Величина I показывает различие между величинами m/n и τ/t .

Результаты оценки величин I для каждого из шести фрагментов и всего времени наблюдений представлены в таблице 2. Здесь также приводятся оценки вероятности неслучайного различия чисел m/n и τ/t (p) [2].

Таблица 2. Оценка сейсмопрогностической информативности «тревожного признака» в изменениях уровня воды в скважине Е1 по данным наблюдений 1996-2007 гг.

Интервал времени (табл. 1)	n, число событий	m, число событий	τ , сут	t, сут	m/n	τ/t	I	p, %
1	4	2 3*	161	800	0.50 0.75*	0.20	2.50 3.75*	88 99*
2	1	1	42	196	1	0.21	4.76	-
3	7	5	149	636	0.71	0.23	3.09	99.6
4	2	2	28	215	1	0.13	7.69	99.98
5	3	2	52	186	0.67	0.28	2.39	88
6	3	2	49	191	0.67	0.26	2.58	89.9
Весь период	20	14 15*	481	2224	0.70 0.75*	0.22	3.18 3.41*	100

Примечание: звездочкой * выделены величины, полученные при включении события I (Кроноцкое землетрясение) в число условно спрогнозированных при параметрах «тревожного признака», указанных в табл. 1 со знаком «?».

Исследование свойств «тревожного признака» в качестве предвестника землетрясений проводилось путем анализа связи параметров «признака» с параметрами 14-ти последующих сейсмических событий - M , R и $M/\lg R$ (табл. 1). На рис. 2 приводятся распределения 20 произошедших землетрясений по площади (а) и в координатах M - R (б), а также диаграммы, показывающие связь параметров «признака» T_a и T_p и магнитуды землетрясений (в, г). В качестве показателя степени связи параметров «признака» и параметров сейсмических событий использовался выборочный коэффициент корреляции r (табл. 3). Жирным шрифтом в таблице 3 выделены значимые величины r при 95% доверительной вероятности.

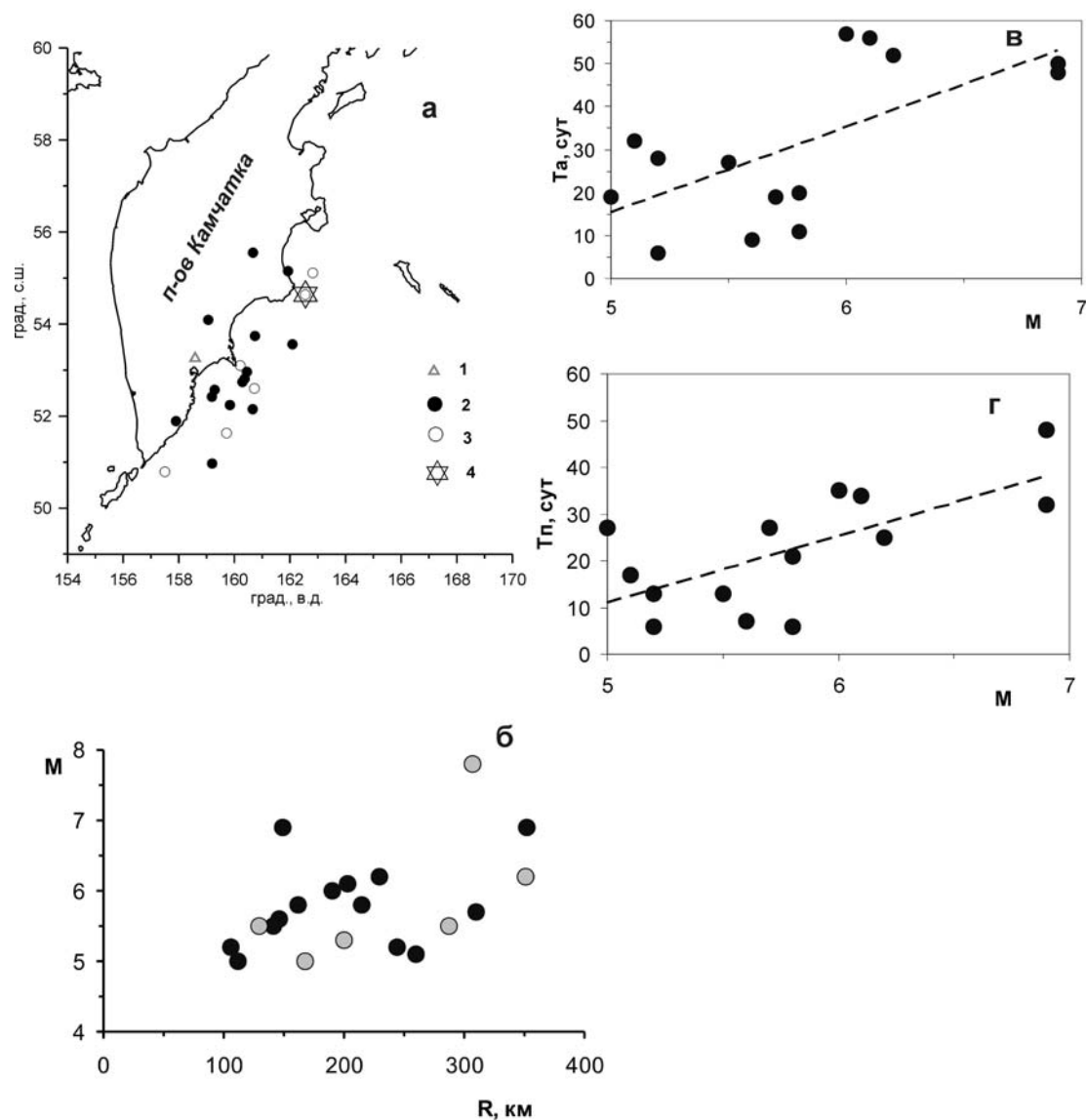


Рис. 2. Распределение сейсмических событий (табл. 1): а - по площади: 1- скважина Е1, 2- события, перед которыми проявлялся «тревожный признак», 3 – события, перед которыми «признак» не выявлен, 4 – инструментальный эпицентр Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M = 7.8$; б - в координатах магнитуда (M) – гипоцентральное расстояние (R): черные кружки – события, перед которыми «тревожный признак» проявлялся, серые кружки – события, перед которыми «признак» не выявлен; в – зависимость заблаговременности проявления «признака» T_a от магнитуды события M ; г – зависимость продолжительности «признака» T_p от магнитуды события M .

Таблица 3. Величины выборочных коэффициентов корреляции r

Параметры сейсмических событий	Параметры «тревожного признака»					
		T_p	T_a	A	$T_э$	dT
M		0.67	0.65	0.51	0.53	0.18
$M/\lg R$		0.57	0.41	0.43	0.12	0.37
R		0.19	0.32	0.09	0.57	0.43

Обсуждение результатов и выводы

Для времени наблюдений 1996-2007 гг. получена ретроспективная величина эффективности «тревожного признака» $I = 3.18$ (табл. 2), показывающая во сколько раз использование «признака» может улучшить прогнозирование сейсмических событий с $M \geq 5$ на расстояниях до 350 км, по сравнению со случайным угадыванием. Если при расчете эффективности I в качестве параметра τ использовать суммарное время тревоги, складывающееся из индивидуальных времен ожидания событий ($T_a - 5$) суток, плюс время ожидания событий до 30 суток в случае «ложной тревоги» при отсутствии землетрясения, то величина $I = 0.70/0.33 = 2.12$. Отсюда следует, что «тревожный признак» в изменениях уровня воды в скважине Е1 можно отнести к полезным предвестникам землетрясений. Следует отметить, что приведенные оценки (табл. 2) характеризуют прогностическую информативность равномерных наблюдений на скважине Е1, в основном, в период низкой (фоновой) сейсмической активности.

Анализ зависимости параметров «признака» от параметров землетрясений показывает значимую положительную корреляцию его заблаговременности T_a и продолжительности T_p от магнитуды сейсмического события (рис. 2в, г, табл. 3). Это означает, что при подготовке более сильных сейсмических событий «признак» может проявляться на относительно больших интервалах времени и с большей заблаговременностью. Этот вывод согласуется с результатами наблюдений в 1987-1998 гг. [3], т. е. в течение периода времени более насыщенного сильными сейсмическими событиями (в 1987-1998 гг. произошло 8 землетрясений с $M = 6.6-7.8$; в 2002-2007 гг. произошло всего одно землетрясение с $M = 6.9$, остальные имели $M = 5.0-6.2$). Для периода 1987-1993 гг. средние величины $T_p \cong T_a$ составляли примерно 100 сут перед землетрясениями с $M = 6.6-7.5$. Оценки величин T_p и T_a для предполагаемого «тревожного признака» перед Кроноцким землетрясением, $M = 7.8$ приводятся в табл. 1 со знаком «?».

Из 20 землетрясений, произошедших в 1997-2007 гг., «тревожный признак» в изменениях уровня воды ретроспективно выявлен перед 14-тью событиями. Отсюда величина вероятности связи «признака» и сейсмических событий составляет 0.7 (табл. 2). Если учесть, что события II и IX (табл. 1) произошли во время постсейсмического повышения уровня после землетрясений I и VIII, а также рассматривать понижение уровня воды в ноябре 1996 г. - апреле 1997 г. в качестве «тревожного признака» перед Кроноцким землетрясением (I), то приведенная оценка вероятности (0.7) является минимальной.

Неожиданной является значимая положительная корреляция между параметром «признака» T_a и гипоцентральной расстоянием R , которая показывает увеличение интервала времени от момента экстремальной скорости понижения уровня воды до землетрясения для более удаленных событий. Также неожиданным является относительное уменьшение величин коэффициентов корреляции между параметрами «признака» и интенсивностью* сейсмического воздействия $M/\lg R$, по сравнению с магнитудой M (табл. 3). По-видимому, необходимо уточнение соответствующих корреляционных зависимостей на более представительном материале.

Выполненный анализ вариаций уровня воды в скважине Е1 в сопоставлении с произошедшими землетрясениями показывает определенные сложности в использовании «тревожного признака» для прогноза сильных землетрясений вследствие естественной редкости таких событий. Дальнейшее продолжение наблюдений на скважине Е1 и обеспечение их непрерывности позволит более определенно оценить свойства «тревожного признака» и его информативность в качестве предвестника сильных камчатских землетрясений.

Список литературы

1. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.
2. Желанкина Т.С., Кушнир А.Ф., Писаренко С.Л. и др. Комплексный статистический анализ геохимических предвестников землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука, 1985. С. 135-148.
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., Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69-79.

* Предложенный автором параметр $M/\lg R$ не основан на физической модели или эмпирических фактах, то есть является умозрительным. – Прим. ред.