

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ В 1996-2007 гг.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А.

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

Введение

Возможность использования сейсмических шумов для мониторинга напряженно-деформированного состояния среды и прогноза землетрясений основывается на присутствии в их составе информативных эндогенных компонент. Важнейшим этапом в исследованиях сейсмических шумов в диапазоне 10-60 Гц (далее мы будем использовать понятие высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), под которым понимаются сейсмические осцилляции в частотном диапазоне первых десятков Гц с амплитудами около 10^{-9} - 10^{-12} м) является обнаружение их модуляции естественными деформирующими процессами: собственными колебаниями Земли, земными приливами и пр. Этот факт был зафиксирован в 1983 г. как научное открытие, авторами которого являются Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошкин, В.В. Цыплаков [5]. Оно имело принципиальное значение, так как обнаруженная модуляция микросейсмического излучения деформирующими процессами подтвердила наличие в сейсмических шумах эндогенных составляющих, что вывело их из разряда помех и позволило рассматривать как самостоятельное информативное явление. С конца 80-х годов на Камчатке ведутся исследования высокочастотного сейсмического шума [7]. К основным направлениям этих работ относится исследование особенностей отклика ВСШ на приливы перед сильными локальными землетрясениями [6]. В данной статье представлены результаты мониторинга ВСШ на Камчатке в 1996-2007 гг. и их использования в оперативном режиме для прогноза сильных региональных землетрясений ($M \geq 6.0$) в диапазоне эпицентральных расстояний до 400 км.

Мониторинг ВСШ как система «наблюдения-анализ-прогноз»

Фундаментальная проблема геофизики, в рамках которой ведутся рассматриваемые исследования, связана с изучением возможности мониторинга напряженного состояния среды и подготовки сильных землетрясений по изменению параметров геофизических полей, к которым следует отнести и поле ВСШ. Под мониторингом понимается комплекс работ, позволяющий выявить тенденции в изменениях контролируемой системы и включающий ведение наблюдений, оперативный анализ получаемых данных и разработку прогнозных заключений о сейсмической опасности. Информационной основой ведения мониторинга ВСШ на Камчатке являются результаты долговременных наблюдений в двух пунктах («Начики» и «Карымшина»), достаточно удаленных от районов антропогенной активности. Система наблюдений и используемая аппаратура подробно описаны в работе [9]. При анализе информации используется способ контроля напряженного состояния среды по изменению параметров отклика ВСШ на приливы [4]. Прогнозные оценки, составленные по результатам анализа ВСШ, используются при комплексной оценке сейсмической опасности региона [1]. Мониторинг параметров ВСШ ведется в оперативном режиме. Заключения о сейсмической опасности с 1996 года регулярно подавались в Общий совет по прогнозу землетрясений Института вулканологии ДВО РАН. В 1998 г. было образовано Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений (с 2006 г. – Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска), куда еженедельно передаются прогностические заключения.

О методике прогноза

Методика является поисковой и направлена на определение возможного положения явления (сильного регионального землетрясения) в будущем. Объектом прогнозирования являются региональные землетрясения в диапазоне эпицентральных расстояний до 400 км от станций регистрации ВСШ. Основным элементом методики является способ прогноза землетрясений [4], разработанный ранее на основе экспериментально выявленного в 1992-1994 гг. эффекта *стабилизации $\Delta\varphi$* . Контролируемый параметр $\Delta\varphi$ – сдвиг фаз между определенной волной приливного гравитационного потенциала и ВСШ-компонентой с соответствующим периодом. Синхронизация ВСШ с внешним приливным воздействием, проявляющаяся в виде стабилизации фазового сдвига, рассматривается как прогностический признак и является новым, ранее не обнаруженным предвестником землетрясений. Оригинальным в данной методике является

использование земных приливов, обусловленных лунно-солнечным гравитационным воздействием, в качестве калибровочного (эталонного) сигнала с известными характеристиками. В качестве опорного (пилот-) сигнала выбрана волна O_1 (период 25.82 ч), так как на Камчатке она имеет наибольшую помехозащищенность и относительно большую амплитуду. В скользящем временном окне шириной 28 суток с шагом 1 сутки методом наименьших квадратов из огибающей ВСШ выделяется гармоническая компонента с периодом 25.82 часа и определяются ее параметры: амплитуда и начальная фаза, из которой может быть получена величина фазового сдвига $\Delta\phi$. В настоящее время методика, основанная на способе прогноза [4], продолжает развиваться в направлении, обеспечивающем уменьшение неопределенности (в частности, пространственной) при сейсмическом прогнозировании.

Основные экспериментальные результаты исследований отклика ВСШ на приливы перед сильными локальными землетрясениями

1. Эффект *стабилизации* $\Delta\phi$ был обнаружен как ретроспективно, так и в режиме реального времени для 28 землетрясений 1992-2007 гг. в диапазоне магнитуд M_w от 5.0 до 7.8 для эпицентральных расстояний до 400 км. Из них 22 события имело $M \geq 6.0$. Лишь перед единственным землетрясением энергетического диапазона $M \geq 6.0$ (08.03.1999, $M_w = 6.9$) предвестник выделить не удалось. В 2001-2007 гг., когда на Камчатке работали уже две станции ВСШ, отмечено появление предвестников перед землетрясениями на обеих станциях одновременно.

Рис. 1. Эпицентры землетрясений, 1992-2007 гг., перед которыми была выявлена синхронизация выделенной из ВСШ приливной компоненты с волной O_1 гравитационного приливного потенциала. 1 – станции ВСШ, 2 – эпицентры, 3 – механизмы очагов.

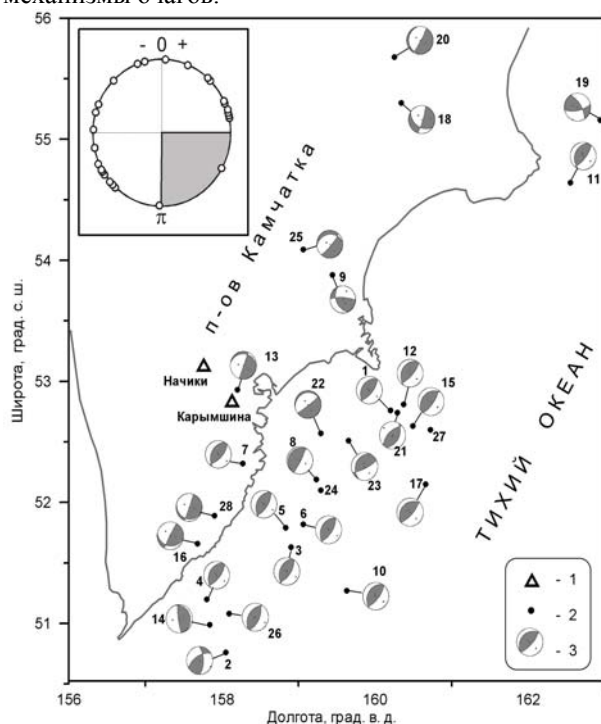


Таблица 1. Камчатские землетрясения 1992-2007 гг., перед которыми была выявлена синхронизация выделенной из ВСШ приливной компоненты с волной O_1 гравитационного приливного потенциала.

№ п/п	Дата,		Магнитуда		№ п/п	Дата,		Магнитуда				
	д.	м.	г.	M_c		M_w	д.	м.	г.	M_c	M_w	
1	02.03.1992			6.8	15*	08.10.2001	6.5	6.4	16	16.10.2002	6.5	6.3
						08.10.2001	6.5	6.3		17	15.03.2003	6.4
2	13.07.1992			6.1	18	16.06.2003	6.6	6.9	19	14.04.2004	6.1	6.1
3	19.12.1992			6.0	20	10.06.2004	6.6	6.8	21	26.07.2005	5.8	
4	08.06.1993	7.3	7.1		22	08.11.2005	5.0	5.0	23	26.11.2005	5.3	5.2
5	13.11.1993	7.0	7.0		24	07.05.2006	5.1		25	22.05.2006	6.0	6.2
6	14.02.1994	5.8	5.9		26	24.08.2006	6.4	6.5	27	09.12.2006	5.6	
7	02.08.1994	5.4	5.9		28	30.05.2007		6.4				
8	01.04.1995		6.0									
9	01.01.1996		6.9									
10	21.06.1996	7.1	6.7									
11	05.12.1997	7.7	7.8									
12	01.06.1998	6.3	6.4									
13	31.10.1998	5.3	5.5									
14	18.09.1999	6.0	6.0									

* - землетрясения 08.10.2001 18 час. 14 мин. 25.7 с. $M_w = 6.4$ и 08.10.2001 18 час. 20 мин. 37.5 с. $M_w = 6.3$ рассматриваются в данной работе (в контексте выделения предвестника и прогнозирования) как единое сейсмическое событие.

2. Проведено определение зависимости «эпицентральное расстояние-магнитуда» для событий 1992-2006 гг., сопровождавшихся стабилизацией $\Delta\phi$ (рис. 2). Эмпирическая зависимость построена по результатам выявления предвестников по данным станции «Начики» в 1992-2006 гг.: $M \geq 4.0 + 0.008 \cdot \Delta$, где $\Delta < 400$ км. Наложение точек, связывающих магнитуду и эпицентральное расстояние для станции «Карымшина», на диаграмму эмпирической зависимости для станции «Начики» показывает хорошее согласование результатов. По мере накопления новых данных используемые в эмпирической зависимости коэффициенты могут быть уточнены.

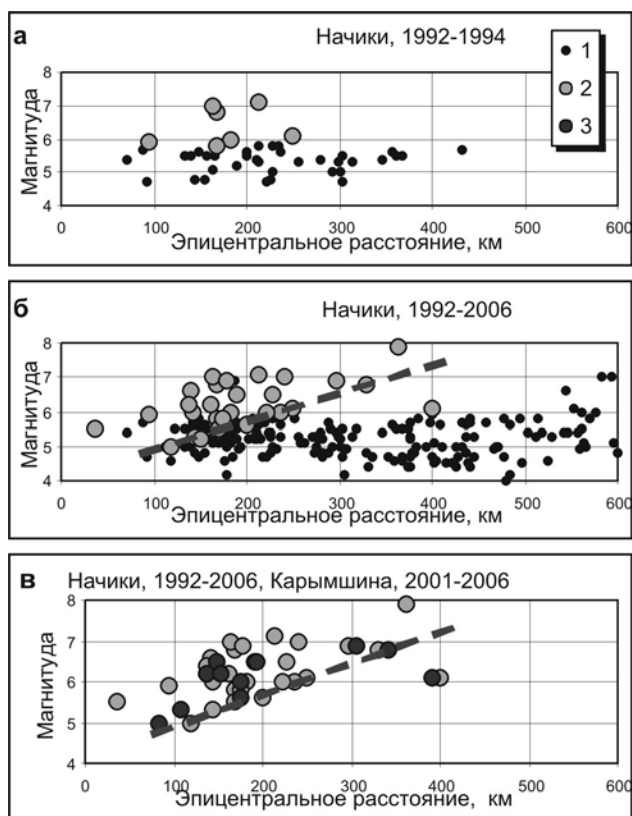


Рис. 2. Зависимость «эпицентральное расстояние-магнитуда» для прогнозируемых событий. а – по данным станции «Начики» за 1992-1994 гг.; б – эмпирическая зависимость, построенная по данным станции «Начики» за 1992-2006 гг. (пунктирная линия); в – наложение точек, связывающих магнитуду и эпицентральное расстояние для станции «Карымшина» за 2001-2006 гг., на диаграмму эмпирической зависимости для станции «Начики». Точки соответствуют землетрясениям, перед которыми: 1 – предвестник не выделен; 2 – выделен предвестник по данным станции «Начики»; 3 – выделен предвестник по данным станции «Карымшина».

круговой диаграммы – сильнейшее коровое землетрясение на суше Камчатки за годы инструментальных наблюдений, Карымское землетрясение 01.01.1996 г. $M_c = 6.9$. Таким образом, обнаружено разделение отклика на субдукционные и коровые землетрясения по значению $\Delta\phi$. Оценка вероятности появления менее 2 точек в заштрихованном секторе при гипотезе о равномерном распределении $\Delta\phi$ на окружности дает величину менее $3 \cdot 10^{-4}$, то есть полученное распределение следует считать неравномерным. Это в свою очередь допускает информативность уровня стабилизации $\Delta\phi$.

4. При анализе зависимости значений $\Delta\phi$ от положения эпицентров землетрясений выявлены пространственные области, в которых произошли сейсмические события, предварявшиеся стабилизацией $\Delta\phi$ на близких значениях. Выявлены четыре группы для мелкофокусных субдукционных землетрясений из южной части камчатской фокальной зоны (Группа 1: № 12, 15, 21, 27; Группа 2: № 8, 17, 22, 23; Группа 3: № 3, 5, 6, 10, 24; Группа 4: № 2, 4, 14, 26) и две группы для верхнемантийных субдукционных событий (Группа 5: № 18, 20; Группа 6: № 16, 28). Номера землетрясений соответствуют таблице 1. Группируемость мелкофокусных землетрясений хорошо согласуется с новейшими разрывными нарушениями: группы землетрясений относятся к различным блокам, разделенных разломами по [10]. Это подтверждает неслучайный характер обнаруженного эффекта.

Результаты использования ВСШ для прогноза землетрясений в 1996-2007 гг.

При оперативной разработке прогнозов в 1996-2005 гг. использовалась оценка объекта прогнозирования, фигурировавшая в официальном описании методики [4]: землетрясение с $M \geq 6.0$ может произойти на эпицентральном расстоянии Δ до 250 км от станции. Эта оценка была получена по достаточно непредставительному материалу 1992-1994 гг. Отдельные несоответствия прогнозных оценок по методу [4] с наблюдаемыми параметрами реализовавшихся землетрясений потребовало уточнения характеристик объекта прогнозирования. В настоящее время (с 2006 г.) используется новая эмпирическая зависимость $M \geq 4.0 + 0.008 \cdot \Delta$, где $\Delta < 400$ км, полученная при обобщении всех имеющихся результатов за 1992-2006 гг. В таблице 2 обобщены результаты многолетнего применения мониторинга ВСШ для прогноза сильных камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$ и $\Delta < 400$ км. Приведены комментарии оправдываемости прогноза. В таблице 2 также представлены ссылки на публикации, в которых зафиксированы факты выделения предвестников.

Таблица 2. Результаты применения мониторинга ВСШ для прогноза сильных камчатских землетрясений с $M \geq 6.0$ в оперативном режиме в 1996-2007 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний до 400 км.

Информация о землетрясении	Выделение предвестника. Дата прогноза.	Формулировка прогноза	Оправдываемость прогноза. Комментарии. Ссылки.
01.01.1996 $M_c = 6.9$ $D_n^* = 140$ км	Ретроспективно		[2]
21.06.1996 $M_w = 6.7$ $D_n = 241$ км	В реальном времени. Прогноз от 18.06.1996.	В течение месяца возможно землетрясение с $M > 6$ между Авачинской бухтой и мысом Крестовый	Прогноз оправдался по всем параметрам. [2]
05.12.1997 $M_w = 7.8$ $D_n = 363$ км	В реальном времени. Прогноз от 02.12.1996.	В течение месяца возможно землетрясение с $M \geq 6$ в радиусе 250 км от регистрирующей станции	Расстояние до инструментального эпицентра превысило ожидаемое. С учетом размеров очага (200 км) землетрясение входит в предсказанную область. Прогноз может быть отнесен к оправдавшимся по всем параметрам. [3]
01.06.1998 $M_w = 6.4$ $D_n = 178$ км	Ретроспективно		[1]
08.03.1999 $M_w = 6.9$ $D_n = 185$ км	Предвестник не выявлен		Единственное землетрясение с $M \geq 6.0$ 1996-2007 гг. в диапазоне эпицентральных расстояний до 400 км, для которого не был выделен предвестник. [1]
18.09.1999 $M_w = 6.0$ $D_n = 236$	В реальном времени. Прогноз от 16.09.1999.	В течение месяца возможно землетрясение с $M \geq 6$ в радиусе 250 км от регистрирующей станции	Прогноз оправдался по всем параметрам. [1]
08.10.2001 $M_w = 6.4$, $M_w = 6.3$ $D_k^{**} = 150$ км	Ретроспективно		Впервые выделен предвестник по данным ст. «Карымшина». Станция «Начики» не работала по техническим причинам. [1]
16.10.2002 $M_w = 6.2$ $D_n = 162$ км $D_k = 137$ км	Ретроспективно		[1]
15.03.2003 $M_w = 6.0$ $D_n = 222$ км $D_k = 175$ км	В реальном времени. Прогноз от 10.01.2003. (п. Карымшина) и от 5.02.2003 (п. Начики).	В течение месяца возможно землетрясение с $M \geq 6$ в радиусе 250 км от регистрирующей станции	Прогноз реализовался по магнитуде и расстоянию. Землетрясение с спрогнозированными параметрами произошло через неделю после завершения срока прогноза. [1]
16.06.2003 $M_w = 6.9$ $D_n = 297$ км $D_k = 306$ км	В реальном времени. Прогноз от 30.05.2003.	В течение месяца возможно землетрясение с $M \geq 6$ в радиусе 250 км от регистрирующей станции	Прогноз реализовался по времени и магнитуде. Предвестник выделен на обеих станциях. [1]
14.04.2004 $M_w = 6.1$ $D_n = 400$ км $D_k = 391$ км	Ретроспективно		Наиболее далекое землетрясение, перед которым отмечен предвестник. Предвестник выделен на обеих станциях. [1]
10.06.2004 $M_w = 6.8$ $D_n = 330$ км $D_k = 342$ км	В реальном времени. Прогноз от 13.05.2004.	В течение месяца возможно землетрясение с $M \geq 6$ в радиусе 250 км от регистрирующей станции	Прогноз реализовался по времени и магнитуде. Предвестник выделен на обеих станциях. [1]
22.05.2006 $M_w = 6.2$ $D_n = 138$ км $D_k = 153$ км	Ретроспективно		Предвестник был экранирован подготовкой более слабого, но близкого землетрясения 07.05.2006 г. с $M = 5$, которое было спрогнозировано по данному методу. [1] Предвестник выделен на обеих станциях.
24.08.2006 $M_w = 6.5$ $D_n = 228$ км $D_k = 194$ км	В реальном времени. Прогноз от 04.07.2006.	В течение месяца возможно землетрясение, удовлетворяющее условиям: Для $D < 120$ км $M > 5.0$, Для $120 < D < 300$ км $M > 4.0 + 0.0083 * D$	Прогноз оправдался по всем параметрам. (продлевался 04.08.06, 18.08.06). Предвестник выделен на обеих станциях. [8]
30.05.2007 $M_w = 6.4$ $D_n =$ км $D_k =$ км	В реальном времени. Сообщение от 18.05.2007.		Предвестник выделен только по данным станции «Начики». Прогноз не был дан, так как предвестник был неправильно интерпретирован.

* D_n – эпицентральное расстояние до станции «Начики»

** D_k - эпицентральное расстояние до станции «Карымшина»

Из 15 рассмотренных землетрясений лишь единственное событие 08.03.1999 Mw = 6.9 не сопровождалось стабилизацией $\Delta\phi$. В 8 случаях предвестник был выявлен в режиме реального времени. Из них в 3 случаях прогноз оправдался по всем параметрам. К случаям оправдавшегося прогноза необходимо отнести и Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 с Mw = 7.8, протяженный очаг которого входит в прогнозируемую пространственную область. В двух случаях прогноз реализовался по времени и магнитуде, но была допущена ошибка при определении расстояния до эпицентра, что связано с использованием недостаточно обоснованного критерия, о чем было сказано выше. В одном случае землетрясение с спрогнозированными параметрами произошло через неделю после завершения срока прогноза.

Заключение

Наработки по выявлению предвестников и прогнозу землетрясений по рассмотренной выше методике, направленной на контроль отклика ВСШ на земные приливы, могут быть использованы при разработках технологий построения комплексных региональных оценок сейсмической опасности, которые ведутся, в частности, в Камчатском филиале Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 07-05-00225.

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998-2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 3-13.
2. Копылова Г.Н., Жалаева Ю.К. О работе экспертной группы секции прогноза землетрясений Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности в 1995-1996 гг. // Опыт прогнозирования сейсмической опасности на Камчатке в 1995-1996 гг. (по материалам работы Межведомственного научно-технического экспертного совета при Камчатском центре мониторинга сейсмической и вулканической активности). Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 1999. С. 4-21.
3. Копылова Г.Н., Жалаева 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.
4. Пат. 2105332 Российская Федерация. Способ контроля напряженного состояния земной коры для прогноза сильных землетрясений / Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. № 94042027/25 Заявл. 23.11.94. Опубл. 20.02.98. Бюл. № 5.
5. Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов Земли // «Открытия в СССР в 1983 г.». Москва. 1984. ВНИИПИ. С. 46.
6. Салтыков В.А. Особенности связи высокочастотного сейсмического шума и лунно-солнечных приливов // Докл. РАН. 1995. т.341. №3. С. 406-407.
7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. 20 лет исследованию сейсмических шумов на Камчатке: от экспериментальных наблюдений к прогнозу землетрясений и моделированию // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. №1 (9). С. 37-50.
8. Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Комплексная оценка сейсмической и вулканической опасности по данным Камчатского филиала РЭС // Отчет КФ ГС РАН «Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки и Командорских островов в 2006 г.». Фонды КФ ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский. С. 406-413.
9. Салтыков В.А., Чебров В.Н., Сеницын В.И., Касахара М., Кугенко Ю.А. Организация наблюдений сейсмических шумов вблизи сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 43-53.
10. Селиверстов Н.И. Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.