

УДК 550.348

О ПРОЯВЛЕНИИ НЕКОТОРЫХ СРЕДНЕСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 6.6$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ 1987–2004 гг.

© 2009 г. Г.Н. Копылова, Ю.К. Серафимова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Представлены результаты анализа проявления пяти видов сейсмологических, геодезических и гидрогеологических предвестников перед тринадцатью сильными ($M_w=6.6-7.8$) землетрясениями Камчатки. Выполнена систематизация предвестников с учетом их состава и длительности проявления перед отдельными событиями. Оценена количественно связь предвестников и землетрясений ($s=0.38-0.80$). Значения s возрастают от 0.43 до 1.0 для предвестников наиболее сильных и близких землетрясений с параметрами $M/lgR \geq 3$ (R – гипоцентрального расстояния до г. Петропавловска-Камчатского, км). Обнаружено, что время проявления ряда предвестников не зависит от магнитуды последующего землетрясения и параметра M/lgR . Возможные механизмы формирования рассмотренных предвестников обсуждаются на основе современных представлений о процессах подготовки землетрясений, их связи с региональными и локальными полями напряжений и с периодами сейсмических активизаций на Камчатке. Оценивается информативность рассмотренных предвестников для прогноза сильных камчатских землетрясений.

Ключевые слова: землетрясения, предвестники, магнитуда, коэффициент ранговой корреляции Спирмена, поле напряжений, процесс подготовки землетрясения, модель, дилатансия.

Введение

В настоящее время прогноз сильных землетрясений – одно из приоритетных направлений наук о Земле. Для решения этой задачи проводятся комплексные сейсмологические, геодезические, гидрогеологические и другие наблюдения с целью диагностики предвестников землетрясений. Систематизация данных о проявлениях различных предвестников и оценка их статистической связи с последующими землетрясениями по данным многолетних наблюдений – необходимый этап разработки методов сейсмического прогноза и создания региональных моделей процессов подготовки землетрясений.

На Камчатке с 60-х годов прошлого столетия проводятся детальные сейсмологические наблюдения и поиск предвестников сильных землетрясений в вариациях слабой сейсмичности [Соболев, 1999]. Со второй половины 70-х годов осуществляются наблюдения за деформациями земной коры [Левин и др., 2006] и режимом подземных вод [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994]. Экспериментальные данные регистрации предвестников перед рядом сильных камчатских землетрясений свидетельствуют, с одной стороны, о возможности среднесрочного прогноза подобных землетрясений с заблаговременностью недели-месяцы и, с другой стороны, о развитии специфических геодинамических процессов в среде Камчатского региона на стадиях их подготовки.

В настоящей работе рассматриваются особенности распределения во времени сильных ($M_w \geq 6.6$) землетрясений Камчатки и проявления перед ними среднесрочных предвестников в изменениях слабой сейсмичности в соответствии с поведением прогностического параметра RTL [Соболев, 1999], длины линий светодальномерных изме-

рений, высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), химического состава подземных вод и уровня воды в скважинах. Проводится статистическая оценка связи различных предвестников с сильными землетрясениями, обсуждаются возможные механизмы формирования аномалий в изменениях рассматриваемых параметров мониторинга на основе современных представлений о процессах подготовки сильных землетрясений.

Сильные землетрясения Камчатки

Сейсмический режим Камчатки отличается временной неравномерностью – периоды фонового режима сменяются периодами активизации, включающими группы сильных землетрясений [Копылова, 2004, 2008а].

С 1959 г. по 2004 г. в сейсмическом режиме Камчатки могут быть выделены пять периодов активизации длительностью от 1.4 года до 3.3 лет, в течение которых происходило от двух до шести землетрясений с магнитудами около 7 и более. Подобные всплески активности соответствуют периодам повышенного выделения сейсмической энергии и, предположительно, заключительным стадиям предшествующих геодинамических процессов в Камчатской зоне перехода континент–океан. Начиная с конца активизации 1959–1960 гг., когда в течение 1.5 лет произошли четыре землетрясения с $M=7.0–7.6$, продолжительность фонового режима между последовательными активизациями изменялась от 10.4 до 2.1 лет, составляя в среднем 7.2 года.

Кумулятивный график выделения сейсмической энергии в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны за время проведения детальных сейсмологических наблюдений 1961–2004 гг. приведен на рис. 1 (верхний график). На том же рисунке представлено распределение во времени землетрясений с $M_w \geq 6.8$ (нижний график).

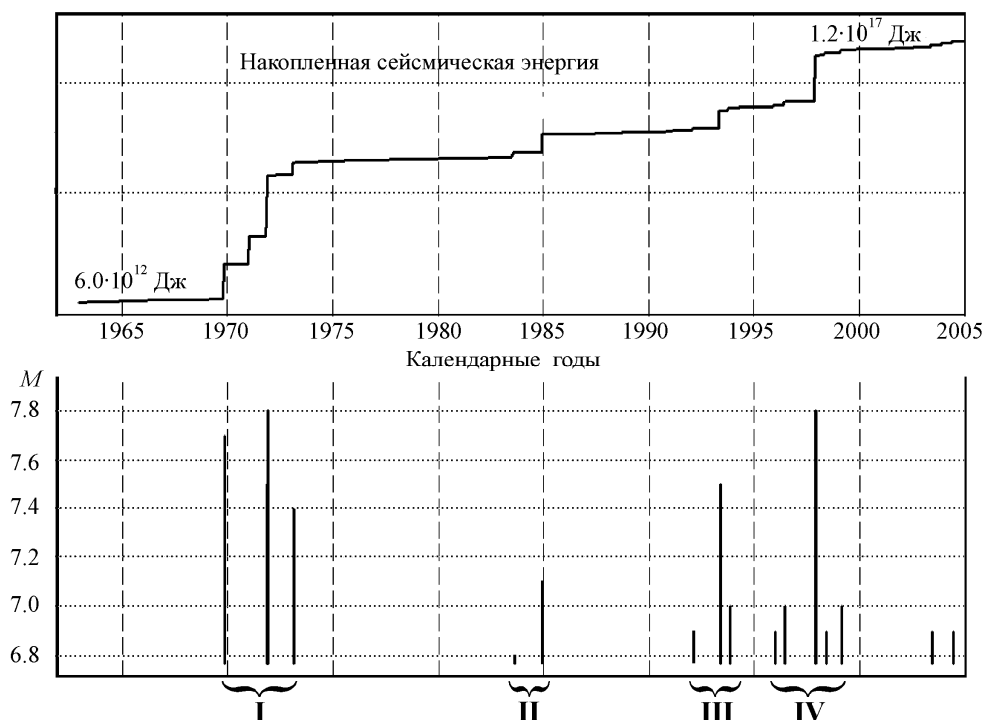


Рис. 1. Кумулятивный график выделения сейсмической энергии в пределах Камчатской сейсмоактивной зоны в 1962–2004 гг. (верхний график) и распределение во времени землетрясений с $M \geq 6.8$ (нижний график). Периоды (интервалы) сейсмической активизации на Камчатке: I – ноябрь 1969 г. – март 1973 г. (четыре землетрясения с $M=7.4–7.8$), II – август 1983 г. – декабрь 1984 г. (два землетрясения с $M=6.8–7.1$), III – март 1992 г. – ноябрь 1993 г. (три землетрясения с $M=6.9–7.5$), IV – январь 1996 г. – март 1999 г. (пять землетрясений с $M=6.8–7.8$) [Копылова, 2004, 2008б]

Распределение во времени сильных землетрясений 1962–2004 гг. свидетельствует о неслучайном характере их группирования. Средняя повторяемость сильных землетрясений составляет 0.36 (14/39) событий в год, т.е. примерно одно событие в три года. Средняя продолжительность периода сейсмической активизации составляет 2.1 года, и на нем можно ожидать, в среднем, менее одного сильного землетрясения (0.75). Фактически, на каждом из выделенных интервалов I–IV происходило 2–4 землетрясения с $M=6.8$ –7.8.

Такая неравномерность сейсмического режима может быть связана с особенностями воздействия космических и общепланетарных факторов на изменения напряженного состояния среды региона, а также с нестационарностью субдукционного процесса в пределах Камчатской зоны перехода континент–океан. Рассматриваемые сильные землетрясения 1987–2004 гг. и их предвестники соответствуют выделенным всплескам сейсмической активности III (1992–1993 гг.) и IV (1996–1999 гг.) [Копылова, 2004, 2008б]; именно на них приходится бо́льшая часть событий – 9 из 13, – представленных в табл. 1.

Таблица 1. Основные данные о сильных землетрясениях, произошедших в Камчатском регионе в 1987–2003 гг.

№ землетрясения	Дата гггг мм дд	Время ччммсс	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Глубина, км	R^* , км	M_w <i>NEIC</i>	$M/\lg R$	Баллы по шкале <i>MSK64</i>	Номер периода активизации (рис. 1)
1	1987 10 06	20:11:36	52.86	160.23	33	120	6.6***	3.17	4–5 <i>PET</i>	
2	1992 03 02	12:29:39	52.76	160.20	20	110	6.9	3.38	5–6 <i>PET</i>	III
3	1993 06 08	13:03:37	51.20	157.80	40	210	7.5	3.23	5 <i>PET</i>	III
4	1993 11 13	01:18:07	51.79	158.83	40	140	7.0***	3.27	5–6 <i>PET</i>	III
5	1996 01 01	09:57:46	53.88	159.44	0	110	6.9***	3.38	4–5 <i>PET</i>	IV
6	1996 06 21	13:57:06	51.27	159.63	2	210	7.0	3.01	3–5 <i>PET</i>	IV
7	1996 07 16	03:48:25	56.00	165.05	40	540	6.6	2.42	–	IV
8	1997 12 05	11:26:51	54.64	162.55	10	200**	7.8	3.39	5–6 <i>PET</i>	IV
9	1998 06 01	05:34:03	52.81	160.37	31	120	6.9	3.32	4–5 <i>PET</i>	IV
10	1999 03 08	12:25:43	51.93	159.72	7	140	7.0	3.26	4–5 <i>PET</i>	IV
11	2003 06 16	22:08:02	55.30	160.34	190	340	6.9	2.73	3–4 <i>PET</i>	
12	2003 12 05	21:26:14	55.78	165.43	29	540	6.7	2.45	2–3 <i>PET</i>	
13	2004 06 10	15:19:55	55.68	160.25	208	380	6.9	2.68	3–4 <i>PET</i>	

Примечание: R^* – гипоцентральное расстояние до г. Петропавловска-Камчатского; R^{**} – расстояние до центра очаговой области, M^{***} магнитуа M_s по данным ГС РАН, г. Обнинск; *PET* – г. Петропавловск-Камчатский.

Проявления среднесрочных предвестников перед сильными ($M_w \geq 6.6$) землетрясениями 1987–2004 гг.

В 1987–2004 гг. на территории Камчатки произошли 13 землетрясений с $M_w=6.6$ –7.8 (см. табл. 1). Они сопровождалась в континентальных районах ощутимыми сотрясениями интенсивностью до 4–7 баллов по шкале *MSK64*. Местоположение эпицентров этих землетрясений показано на рис. 2.

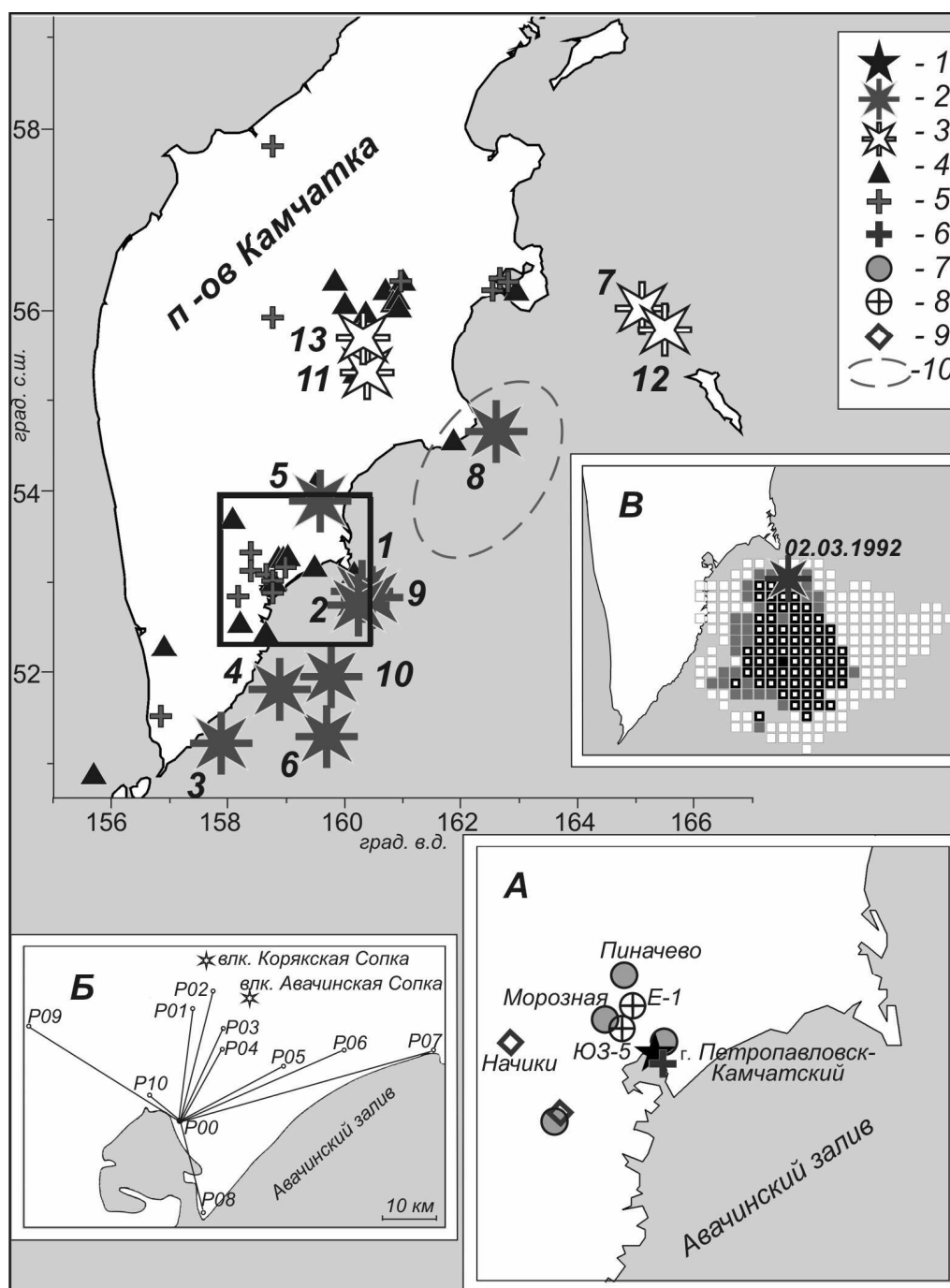


Рис. 2. Местоположение эпицентров землетрясений 1987–2004 гг. с $M \geq 6.6$ и расположение пунктов наблюдений (квадрат – территория Петропавловского полигона). На врезках: А – расположение пунктов наблюдений за вариациями высокочастотного сейсмического шума (ВСШ), уровня и химического состава воды в скважинах на территории Петропавловского полигона; Б – схема расположения линий светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная: P00 – обсерватория Мишенная, P01, ..., P10 – линии светодальномерных измерений; В – пространственное положение аномалии RTL перед землетрясением 02.03.1992 г. [Кравченко, 2005]. Условные обозначения: 1 – центр сбора и обработки информации в г. Петропавловске-Камчатском; 2 – землетрясения с $M/\lg R \geq 3$; 3 – землетрясения с $M/\lg R < 3$; 4 – радиотелеметрические сейсмические станции; 5 – пункты GPS-наблюдений; 6 – обсерватория Мишенная; 7 – пункты гидрогеохимических наблюдений за составом подземных вод; 8 – пьезометрические скважины, на которых регистрируются вариации уровня воды; 9 – пункты наблюдений за высокочастотным сейсмическим шумом; 10 – очаговая зона Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. ($M_w=7.8$)

Двенадцать из тринадцати землетрясений (№№ 1–4, 6–13) относятся к межплитовым, которые возникают в коре и верхней мантии при взаимодействии океанической Тихоокеанской плиты и двух континентальных микроплит – Охотоморской и Берингской. Подобные землетрясения приурочены к области наклонной сейсмофокальной зоны, падающей под континент [Федотов и др., 1985]. Землетрясение № 5 произошло в коре Восточного вулканического пояса.

Анализ проявления среднесрочных предвестников перед землетрясениями, приведенными в табл. 1, проводился с привлечением данных из [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Соболев, 1999; Копылова, 2001; Рябинин, 2004; Салтыков, 2004; Хаткевич, Кравченко, 2005; Левин и др., 2006; Копылова, 2008а]. В указанных публикациях приведены результаты многолетних наблюдений, описаны выявленные предвестники и даны оценки времени их проявления перед конкретными землетрясениями. В настоящей работе для количественной оценки предвестниковых аномалий использовался параметр T – время от начала проявления аномалии до момента землетрясения.

Следует отметить, что линии светодальномерных измерений из обсерватории Мишенная (рис. 2, Б), пункт регистрации ВСШ Начики и пункты наблюдений за режимом подземных вод расположены на сравнительно небольшой территории Петропавловского полигона (рис. 2, А). Методика анализа режима слабой сейсмичности по параметру RTL предполагает сканирование практически всей территории Камчатской сейсмоактивной зоны [Соболев, 1999; Кравченко, 2005].

В качестве примера на рис. 3 приводятся результаты наблюдений за предвестниками землетрясения 02.03.1992 г. с $M_w=6.9$ (см. табл. 1, № 2). Прослежены изменения сейсмологического параметра RTL [Соболев, 1999], длин линий светодальномерных измерений [Зобин и др., 1996] и характеристик подземных вод [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Копылова, 2001]. Продолжительность проявления предвестников по данным сейсмологических, светодальномерных и гидрогеологических наблюдений перед землетрясением 02.03.1992 г. изменялась от одного до девяти месяцев. По мере приближения момента землетрясения, число методов, по которым проявлялись предвестники, и число пунктов наблюдений, на которых фиксировались аномалии, постепенно увеличивалось и достигло максимума примерно за месяц до события. Наиболее яркие аномалии проявились в изменениях концентраций компонентов химического состава подземных вод и газов в самоизливающихся скважинах ГК-1 (ст. Пиначево) и скв. 1 (ст. Морозная) (расположение станций см. рис. 2, А). Такой же характер проявления различных видов предвестников сохранялся и перед другими камчатскими землетрясениями, что указывает на относительное постоянство механизмов их образования.

По данным светодальномерных наблюдений из обсерватории Мишенная (см. рис. 2, Б) в качестве предвестника в [Левин и др., 2006] рассматривается бухтообразное укорачивание длин измерительных линий, указывающее на горизонтальное сжатие территории полигона на стадии подготовки землетрясений (см. рис. 3). Эпизоды горизонтального сжатия выявлены перед землетрясениями №№ 1, 2, 8 (см. табл. 1). Продолжительность предвестника составляла от 8–9 до 24 месяцев.

Используя данные наблюдений за химическим составом воды, изливающейся из скважины ГК-1 (ст. Пиначево) (см. рис. 3), авторы работ [Копылова, Сугробов, Хаткевич, 1994; Хаткевич, Рябинин, 2004] в качестве предвестника рассматривают аномальные изменения концентрации ряда химических компонент воды и свободного газа в ней. Так, перед землетрясениями №№ 1–5, 8 наиболее сильные аномалии были отмечены в понижении концентрации иона хлора. В качестве механизма формирования такого предвестника в [Копылова, 2008б] рассматривается изменение условий смешивания контрастных по химическому составу подземных вод в питающей скважину водоносной системе за счет увеличения доли воды с пониженной минерализацией. Этот процесс может

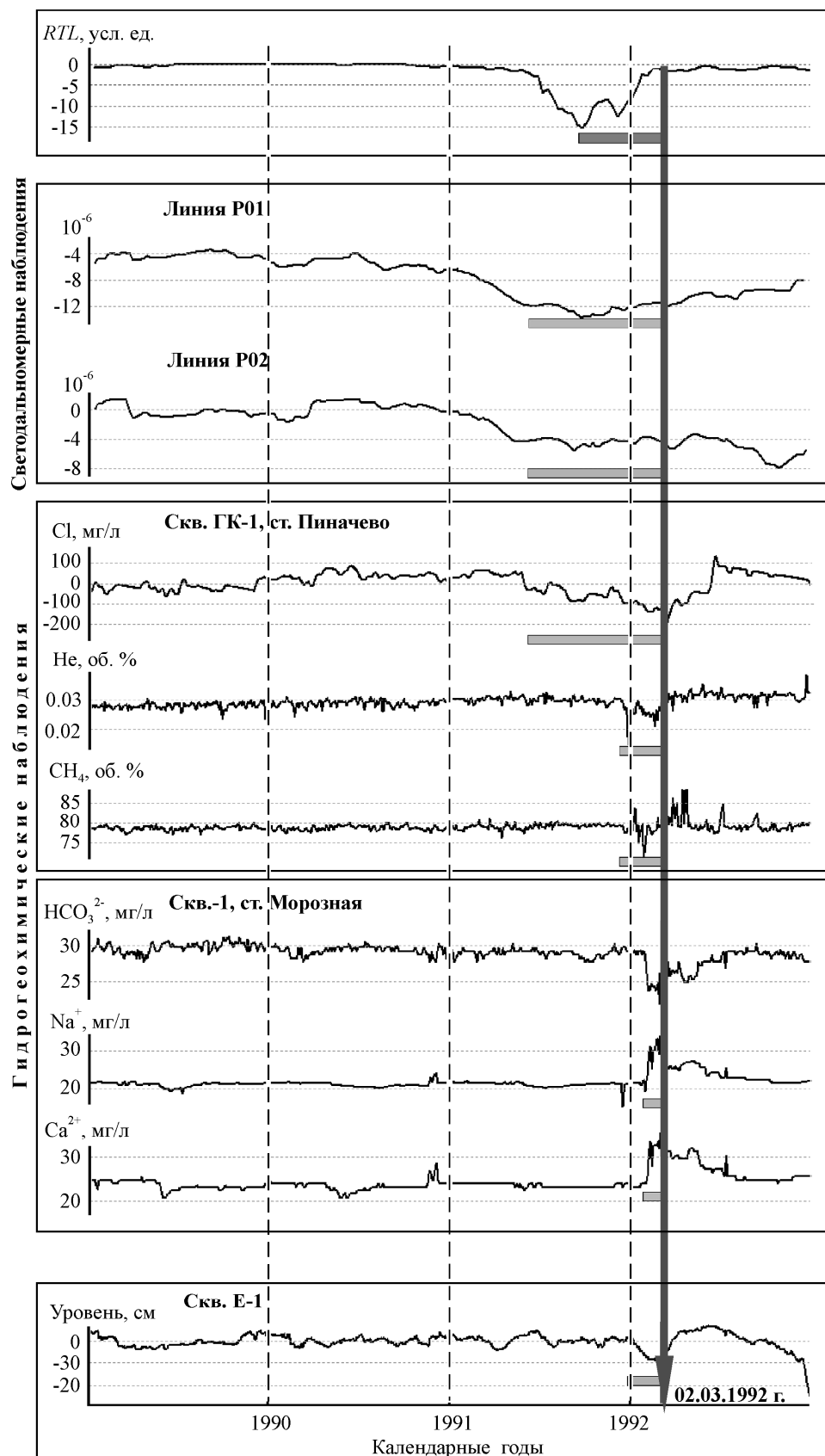


Рис. 3. Проявление предвестников перед землетрясением 02.03.1992 г. с $M_w=6.9$ по данным разных методов наблюдений. Вертикальная стрелка – момент землетрясения, R – расстояние до центра Петропавловского полигона, км (см. рис. 2). Серые утолщенные отрезки – временные интервалы проявления каждого из выявленных предвестников

эффективно развиваться только при относительном увеличении проницаемости водовмещающих пород в водоносной системе по отношению к слабоминерализованным подземным водам, распространенным в приповерхностной зоне. Продолжительность предвестника составляла 1.5–9 мес.

В [Копылова, 2001, 2008a] при уровнемерных наблюдениях в скв. Е1 (рис. 2, А; 3) в качестве предвестника рассматривается повышение скорости снижения уровня воды в течение недель–первых месяцев. Проявление этого предвестника объясняется увеличением емкости водовмещающих пород в контролируемой водоносной системе и снижением в ней флюидного давления. Продолжительность предвестника варьирует от 3 до 36 недель.

Метод выделения предвестника в изменениях ВСШ основан на изучении вариаций фазы компоненты шума, связанной с воздействием приливной волны O_1 [Салтыков, 2004]. Признаком подготовки землетрясения является стабилизация фазы на одном из уровней в течение не менее трех недель. В качестве механизма формирования такого предвестника в [Кугаенко, Салтыков, 2006] рассматривается усиление микросейсмической эмиссии вследствие разуплотнения (дилатансии) нагруженных горных пород верхней части земной коры и понижение порога эффективного приливного воздействия. Перед рассматриваемыми землетрясениями (см. табл. 1) продолжительность этого предвестника составляла от 23 до 48 сут.

Анализируя вариации прогностического параметра RTL , рассчитываемого в окрестности очагов сильных землетрясений по данным об относительно слабых землетрясениях на глубинах 30–100 км, Г.А. Соболев [1999] рассматривает в качестве предвестника бухтообразное изменение RTL (см. рис. 3). Уменьшение и последующее увеличение параметра RTL указывает на смену стадии сейсмического затишья стадией активизации в окрестности очага будущего землетрясения. По [Кравченко, 2005], продолжительность этого предвестника отсчитывается от момента достижения параметром RTL минимума до момента землетрясения, т.е. рассматривается последняя фаза бухтообразного изменения параметра RTL , соответствующая сейсмической активизации. В настоящей работе она оценивается в 5–31 мес. Зоны сейсмической активизации перед землетрясениями №№ 2–4, 8 (см. табл. 1) располагались в области будущих очагов [Соболев, 1999]. Зоны сейсмического затишья, выделяемые по минимальным величинам параметра RTL , обычно смещены относительно будущих очагов, и инструментальные эпицентры сильных землетрясений располагаются в краевых частях зон сейсмического затишья. Пример площадного распространения аномалии сейсмического затишья перед землетрясением 02.03.1992 г. приведен на рис. 2, В.

С.В. Гольдиным [2004, 2005] дана качественная характеристика физического механизма образования такого предвестника. Этот механизм включает процесс эволюции мезоструктуры “большой” области подготовки землетрясения, размер которой может значительно превышать линейные размеры будущего очага. Полагается, что в пределах этой области могут формироваться зоны пластического течения геоматериала, соответствующие областям сейсмического затишья, а также зоны упрочнения геоматериала, в пределах которых преобладает диссипация упругой энергии по механизму хрупкого разрушения, проявляющаяся в образовании областей сейсмической активизации. В модели, рассматриваемой в [Ребецкий, 2007], подготовка землетрясения характеризуется достижением в области будущего очага предельного состояния как за счет повышения уровня сдвиговых напряжений, так и за счет снижения сил трения и эффективного сцепления на будущем разрыве. Наиболее благоприятные условия для формирования протяженного разрыва могут возникать, когда в зоне разлома рядом с областью с высоким уровнем напряжений (область сейсмической активизации) имеется область с низким уровнем напряжений (область сейсмического затишья).

Для каждого из тринадцати анализируемых камчатских землетрясений определялся состав предвестников и время их проявления (T) по данным пяти методов наблюдений (табл. 2). На диаграммах, приведенных на рис. 4, вертикальными стрелками отмечены моменты землетрясений. Длина горизонтальных отрезков соответствует времени проявления предвестников T , установленным по данным разных методов в течение двух лет, предшествующих каждому из землетрясений.

Таблица 2. Продолжительность проявления предвестников (T), фиксируемых разными методами наблюдений

№ землетрясения	Дата землетрясения гггг мм дд	Метод наблюдений				
		Метод RTL , T , мес.	Метод ВСШ (пункт Начики) T , сут	Светодальномерные измерения, T , мес.	Гидрогеологические методы	
					понижение уровня воды в скв. Е1, T , нед.	изменение концентрации иона хлора в скв. ГК-1 (ст. Пиначево), T , мес.
1	1987 10 06	5	нет данных	8–9	5	6.5–7
2	1992 03 02	6	продолжительность неизвестна	8–9	9.5	9
3	1993 06 08	10	34	не выявлен	36	1.5
4	1993 11 13	15	продолжительность неизвестна	не выявлен	12	1.5
5	1996 01 01	14	28	не выявлен	нет данных	3
6	1996 06 21	11	23	не выявлен	14	не выявлен
7	1996 07 16	6	не выявлен	не выявлен	не выявлен	не выявлен
8	1997 12 05	24	~35	~24	продолжительность неизвестна	5–6
9	1998 06 01	не выявлен	25	нет данных	7	не выявлен
10	1999 03 08	27	не выявлен	нет данных	нет данных	не выявлен
11	2003 06 16	нет данных	41	нет данных	нет данных	не выявлен
12	2003 12 05	не выявлен	не выявлен	нет данных	не выявлен	не выявлен
13	2004 06 10	нет данных	48	нет данных	7	нет данных

Рассмотрим зависимость числа методов N , в данных которых проявлялись предвестники, от величины параметра $M/\lg R$, характеризующего интенсивность сейсмического воздействия в районе Петропавловского полигона (M – магнитуа землетрясения, R – эпицентральное расстояние до г. Петропавловска-Камчатского, км). Для землетрясений с $M/\lg R \geq 3$ значение N варьирует от трех до пяти. Исключение составляют два события – 01.06.1998 г. и 08.03.1999 г. (см. табл. 1). Перед первым из них проявлялся предвестник только по данным регистрации ВСШ, перед вторым – по параметру RTL (см. рис. 4). Землетрясения произошли через 6 и 15 мес. после сильнейшего Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г. Можно предположить, что воздействие процессов подготовки этих землетрясений на режим наблюдательных скважин ГК-1 и Е1 происходило на фоне релаксации флюидонасыщенной среды после Кроноцкого землетрясения и развития постсейсмических вариаций в изменениях уровня и химического состава подземной воды.

Все землетрясения с $M/\lg R < 3$ произошли севернее Кроноцкого полуострова (см. рис. 2) и уменьшение величины $M/\lg R$ определяется их относительно большими эпицентральными расстояниями ($R = 340–540$ км) от территории Петропавловского полигона; для этих землетрясений значения N составляют от 0 до 2. Такая особенность проявления числа предвестников в зависимости от параметра $M/\lg R$, учиты-

вающего удаленность землетрясения от территории полигона, показывает, что

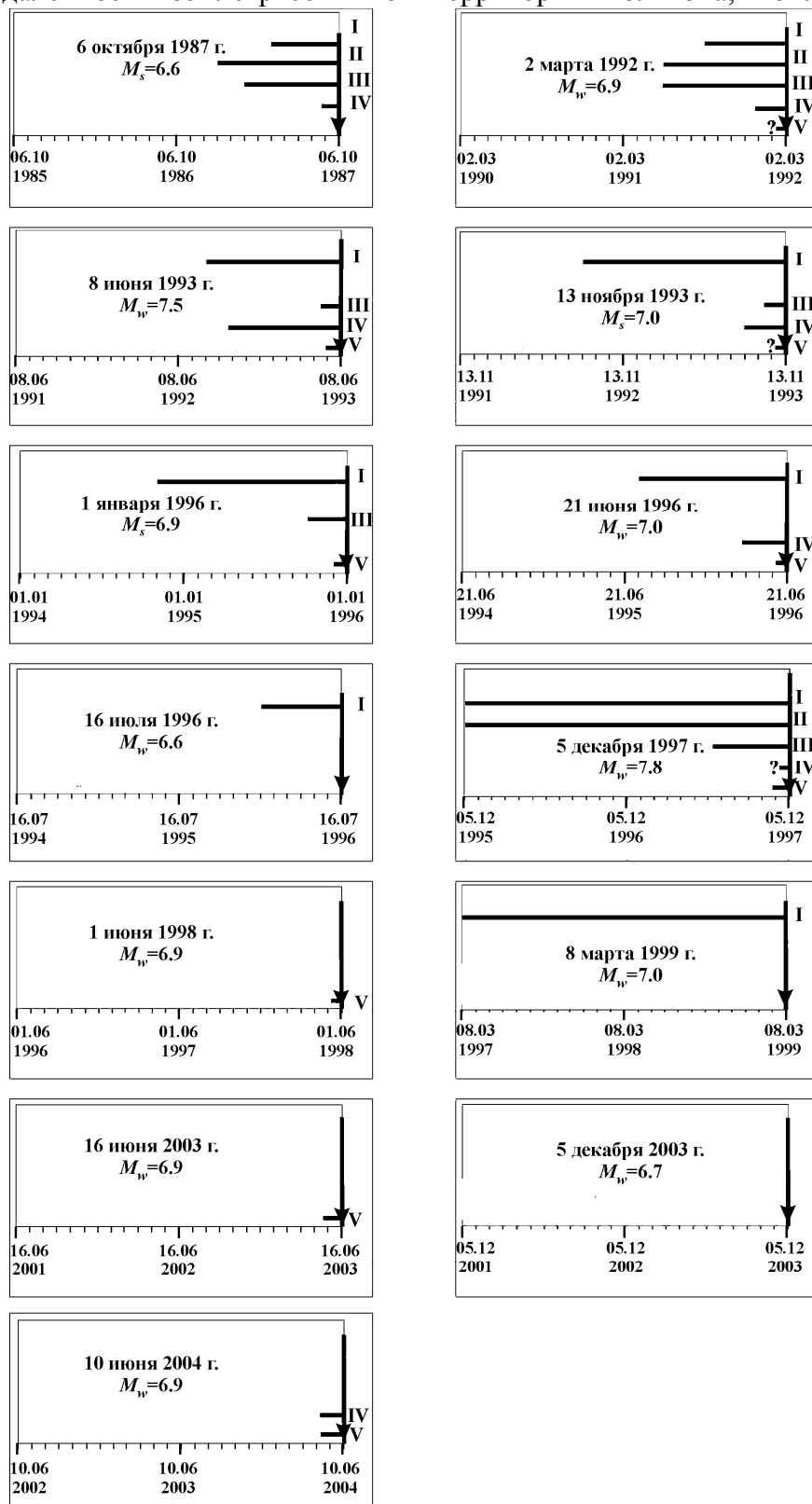


Рис. 4. Состав предвестников (I–V) и время их проявления (горизонтальные отрезки) перед землетрясениями 1987–2004 гг. с $M \geq 6.6$. Горизонтальная ось – два календарных года, предшествующих землетрясению; вертикальная стрелка – момент землетрясения. I – аномалии режима слабой сейсмичности по параметру RTL ; II – укорачивание длин линий светодальномерных измерений; III – уменьшение концентрации иона хлора в воде скважины ГК-1 (ст. Пиначево); IV – по-

нижение уровня воды в скважине Е1; V – стабилизация фазы приливной компоненты O_1 в изменениях ВСШ (пункт Начики); ? – предвестник выявлен, но нет данных о его продолжительности в среднесрочном режиме при существующей конфигурации наблюдательной сети величина числа предвестников N является достаточно информативной при прогнозировании наиболее сильных и относительно “близких” по отношению к территории Петропавловского полигона землетрясений.

Результаты корреляционного анализа зависимостей $T-M$ и $T-M/\lg R$ по четырем из пяти методов приведены в табл. 3. Данные метода светодальномерных измерений не рассматривались в связи с малым объемом выборки ($n=3$, см. табл. 2). В качестве величины, характеризующей статистическую связь времени проявления предвестников и параметров землетрясений, использовался коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ при величине статистической значимости $p \leq 0.05$ [Большев, Смирнов, 1965].

По полученным величинам ρ (см. табл. 3) обнаружена прямая статистически значимая зависимость времени проявления предвестников T от магнитуды последующего землетрясения M для сейсмических активизаций по параметру RTL , а также для понижений уровня воды в скважине Е1. Вместе с тем, такая связь не обнаруживается для времени стабилизации фазы компоненты O_1 в изменениях ВСШ и понижений концентрации иона хлора в воде скважины ГК-1. Это говорит о том, что время проявления двух видов предвестников из четырех не является информативной характеристикой при оценке величины магнитуды последующего землетрясения.

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа зависимости времен проявления предвестников T от параметров землетрясений M и $M/\lg R$

		ВИД НАБЛЮДЕНИЙ			
		Вариации слабой сейсмичности (параметр RTL)	Высокочастотный сейсмический шум (ВСШ)	Гидрогеологические наблюдения	
				уровень воды	химический состав воды
M	ρ	1.0	–	0.94	–
	n	4	7	6	6
$M/\lg R$	ρ		–	–	–
	n		7	6	6

Примечание: ρ – коэффициент ранговой корреляции Спирмена при величине статистической значимости $p \leq 0.05$ для выборок объемом $n \geq 4$, где n – число землетрясений, перед которыми проявлялся предвестник с установленным временем проявления; «–» – получена величина ρ с уровнем значимости $p \geq 0.05$.

По результатам корреляционного анализа связи между временем проявления предвестников T и параметром $M/\lg R$ не получено значимых величин ρ ни для одного из трех рассмотренных методов наблюдений (см. табл. 3). Таким образом, результаты корреляционного анализа зависимостей $T-M$ и $T-M/\lg R$ показывают, что параметр продолжительности предвестников T не позволяет обеспечить одновременную прогнозную оценку магнитуды и удаленности сильных землетрясений с использованием рассмотренных методов.

По отдельным видам наблюдений имеются данные за более короткий период, который меньше интервала 1987–2004 гг. Для них в качестве показателя связи землетрясений и предвестников использовалось отношение $s = n/m$, где n – число землетрясений, перед которыми проявлялся предвестник; m – число произошедших землетрясений в рассматриваемый период наблюдений по каждому методу (табл. 4). Величина s характеризует вероятность связи отдельных видов предвестников и сильных землетрясений. Величина s' (см. табл. 4) характеризует связь предвестников и наиболее сильных

землетрясений, расположенных сравнительно близко к территории Петропавловского полигона ($M/lgR \geq 3.0$).

Таблица 4. Оценка параметров связи s и s' между проявлениями среднесрочных предвестников по отдельным методам и сильными землетрясениями Камчатки 1987–2004 гг.

	ВИД НАБЛЮДЕНИЙ				
	Вариации слабой сейсмичности (параметр RTL)	Высокочастотный сейсмический шум (ВСПШ)	Геодезический (светодальномерные измерения)	Гидрогеологические	
				уровень воды	химический состав воды
	1987–2003 гг.	1992–2004 гг.	1987–1998 гг.	1987–1998 гг., 2003–2004 гг.	1987–2003 гг.
n	9	9	3	8	6
m	12	12	8	10	12
$s=n/m$	0.75	0.75	0.38	0.80	0.50
n'		7	3	7	6
m'		8	7	7	9
$s'=n'/m'$		0.86	0.43	1.0	0.67

Примечание: n – число землетрясений, перед которыми проявлялся предвестник, m – число землетрясений в рассматриваемый временной период, n' – число землетрясений с $M/lgR \geq 3$, перед которыми проявлялся предвестник, m' – число землетрясений с $M/lgR \geq 3$ в рассматриваемый временной период.

Связь предвестников и землетрясений с $M \geq 6.6$ характеризуется величинами $s=0.38–0.80$ (см. табл. 4). Если рассматривать только наиболее сильные землетрясения, произошедшие сравнительно недалеко от территории Петропавловского полигона ($M/lgR \geq 3$, $R=110–210$ км, рис. 2), то связь предвестников и землетрясений несколько улучшается – $s'=0.43–1.0$. Это указывает на то, что наблюдательная сеть, расположенная на территории Петропавловского полигона, ориентирована, в основном, на диагностику предвестников землетрясений в пределах фрагмента Камчатской сейсмоактивной зоны, включающего южную часть Кроноцкого залива, Авачинский залив и Южную Камчатку (примерно $51^\circ–54^\circ$ с.ш.).

О механизмах формирования предвестников сильных камчатских землетрясений

Общая характеристика предвестников сильных камчатских землетрясений приведена в табл. 5. Там же дается и их интерпретация в рамках моделей подготовки землетрясений, предлагаемых в работах [Гольдин, 2004, 2005; Ребецкий, 2007]. В соответствии с этими моделями, в качестве основных структурных элементов областей подготовки землетрясений рассматриваются зоны разломов, характеризующиеся неоднородным строением и наличием участков с различной степенью диспергированности материала (мягкие и жесткие включения). К ним же относятся и сложно построенные и эволюционирующие во времени “большие области” подготовки землетрясений, чувствительные к флюидо-метаморфическим и динамическим процессам в зонах разломов. Сейсмофокальная зона Камчатки может рассматриваться в качестве главного регионального разлома, в пределах которого происходит формирование подавляющего большинства очагов землетрясений, в том числе сильнейших. С учетом максимальной удаленности от сейсмофокальной зоны пунктов наблюдений, на которых проявлялись

предвестники, размеры “больших областей” подготовки землетрясений могут составлять первые сотни километров.

Таблица 5. Общая характеристика предвестников сильных камчатских землетрясений и их интерпретация в рамках моделей подготовки землетрясений по [Гольдин, 2004, 2005; Ребецкий, 2007]

	В И Д Н А Б Л Ю Д Е Н И Й				
	Вариации слабой сейсмичности (параметр RTL)	Высокочастотный сейсмический шум (ВСПШ)	Светодальномерные измерения	Гидрогеологические наблюдения	
				уровень воды	химический состав воды и газа
Характер предвестника	Смена стадии сейсмического затишья стадии активизации	Стабилизация фазы компоненты O_1	Горизонтальное сжатие континентальных районов	Понижение	Аномальные изменения
Предполагаемый механизм формирования по [Алексеев, Белоносов, Петренко, 2001; Гольдин, 2004, 2005; Ребецкий, 2007]	Формирование мезоструктуры “большой” очаговой области, включающей зоны пластического течения и упрочнения геоматериала	Развитие верхнего яруса дилатансионного разрыхления	Упругое сжатие верхнего слоя коры (как внешней области по отношению к зоне нижнего яруса дилатансионного разрыхления в зоне разлома?)	Развитие верхнего яруса дилатансионного разрыхления:	
				реакция порового давления на увеличение емкости водовмещающих пород	изменение условий смешивания контрастных по химическому составу вод в водоносных системах
Масштабный уровень поля напряжений по [Ребецкий, 2007]	Региональный	Локальный	Региональный	Локальный	Локальный
Время проявления перед землетрясениями	Затишье – 0.8–3 лет; активизация – 0.4–2.2 лет	23–48 сут	0.7–2 лет	1–8 мес.	1–9 мес.
Показатель связи предвестника с землетрясениями s (s')	0.75	0.75 (0.86)	0.38 (0.43)	0.80 (1.0)	0.50 (0.67)

В работах [Гольдин, 2004, 2005] в качестве ведущих процессов при образовании структуры “большой области” рассматривается пластическое течение и хрупкое разрушение геоматериала, а также его дилатансионное разрыхление с образованием глубинных и поверхностных зон трещинной дилатансии.

В работе [Алексеев, Белоносов, Петренко, 2001] в качестве наиболее универсального механизма формирования предвестников рассматривается образование приповерхностных зон трещинной дилатансии на стадиях подготовки землетрясений вследствие действия касательных и растягивающих напряжений вблизи свободной поверхности. Латеральные размеры таких зон могут значительно превышать размеры очага будущего землетрясения.

В работе [Ребецкий, 2007] предложено разделение полей напряжений, определяющих напряженно-деформированное состояние геологической среды, по масштабным уровням в соответствии с линейными размерами: региональный масштабный уровень с размерами до первых десятков – сотен километров и локальный масштабный уровень с размерами от первых километров до первых сотен метров. Вариации слабой

сейсмичности и горизонтальные деформации континентальных районов по данным светодальномерных измерений на линиях длиной до первых десятков километров определяются, в основном, региональным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Эти показатели, по-видимому, отражают наиболее общие закономерности формирования мезоструктуры “больших областей” подготовки землетрясений. Проявление аномалий в их изменениях на стадиях подготовки землетрясений составляет первые годы (примерно от одного года до трех лет).

Аномалии в режиме скважин, в изменениях ВСШ, а также ряд других предвестников, регистрируемых на отдельных наблюдательных станциях, определяются преимущественно локальным масштабным уровнем изменения напряженно-деформированного состояния верхнего слоя земной коры. В качестве наиболее вероятного механизма их формирования можно рассматривать развитие приповерхностного слоя трещинной дилатансии (“пограничного” по [Алексеев, Белоносов, Петренко, 2001] или верхнего яруса дилатансионного разрыхления по [Гольдин, 2004]). Характер проявления рассмотренных гидрогеологических предвестников (понижение уровня воды с повышенной скоростью, понижение концентрации иона хлора) и предвестника, проявляющегося в изменениях ВСШ, качественно объясняются именно таким механизмом их формирования. Длительность проявления таких предвестников перед землетрясениями обычно меньше, чем длительность предвестников в вариациях слабой сейсмичности и в горизонтальных деформациях земной коры, и составляет десятки суток – первые месяцы. Это может быть показателем относительной независимости развития во времени вариаций регионального и локальных полей напряжений, контролирующих образование соответствующих видов предвестников. Кроме этого, длительность развития предвестников в изменениях режима подземных вод и в ВСШ может также зависеть от местных геологических и гидрогеологических условий в районах наблюдательных пунктов, определяющих особенности механизмов формирования отдельных видов предвестников при развитии трещинной дилатансии в горных породах приповерхностного слоя земной коры.

Возможные причины нестабильности проявления предвестников перед сильными землетрясениями Камчатки

Для рассмотренных предвестников характерна определенная нестабильность их связи с землетрясениями с $M=6.6-7.8$ ($s=0.38-0.80$) и некоторое улучшение этой связи с относительно близкими и сильными событиями ($s'=0.43-1.0$). Например, горизонтальное сжатие территории Петропавловского полигона по данным светодальномерных измерений было выявлено перед первым землетрясением (02.03.1992 г.) в группе из трех событий, составляющих активизацию III, а также перед наиболее сильным событием (Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г.) в группе активизации IV. По понижению концентрации иона хлора также наиболее яркие аномалии фиксировались перед этими двумя землетрясениями, характеризующимися максимальными величинами интенсивности сейсмического воздействия по параметру M/lgR и по балльности в районе г. Петропавловска-Камчатского (см. табл. 1).

Такая нестабильность связи рассмотренных предвестников и сильных землетрясений Камчатки и некоторое улучшение этой связи для относительно близких и наиболее сильных событий дают основание полагать, что формирование предвестников может контролироваться не только процессами подготовки отдельных землетрясений, но и геодинамическими процессами, связанными с возникновением групп сильных землетрясений. Во время сейсмических активизаций, включающих несколько сильных зем-

летрясений, их форшоки и афтершоки, региональные и локальные поля напряжений могут испытывать значительные флуктуации вследствие наложения процессов подготовки отдельных землетрясений, их реализации и релаксации среды на постсейсмических стадиях. Слабая статистическая связь между временем проявления большей части рассмотренных предвестников и параметрами землетрясений также указывает на правомочность гипотезы о многофакторном характере формирования предвестников.

Следует отметить, что для большей части рассмотренных предвестников авторские оценки минимального порога магнитуды землетрясений, перед которыми они могут проявляться, составляют меньше 6.6. Предвестники фиксировались и перед более слабыми сейсмическими событиями, чем рассмотренные в настоящей работе события с $M \geq 6.6$. Например, аномалии сейсмического затишья по параметру RTL были выявлены перед землетрясениями с $M \geq 6.0$ [Кравченко, 2005]. Стабилизация фазы O_1 в изменениях ВСШ [Салтыков и др., 2008], понижения уровня воды в скважине Е1 [Копылова, 2001, 2008] и вариации компонентов химического состава подземных вод – перед землетрясениями с $M \geq 5.0$. При этом оценки связи таких предвестников с более сильными событиями обычно улучшаются по сравнению с оценками их связи с событиями минимального порогового уровня по магнитуде (см., например, [Копылова, 2001; Салтыков и др., 2008]).

Нестабильное проявление предвестников в изменениях ВСШ и в режиме подземных вод перед землетрясениями с $M \approx 5$ может, с одной стороны, указывать на эпизодическую детерминированную связь процессов их подготовки и соответствующих видов предвестников. С другой стороны, проявления предвестников перед слабыми землетрясениями может быть и случайным. В этом случае проявления аномальных изменений в поведении рассматриваемых параметров мониторинга, а также и собственно слабые сейсмические события, могут быть связаны с более масштабными геодинамическими процессами, определяющими возникновение сейсмических активизаций в Камчатской зоне перехода континент–океан. В качестве источников таких геодинамических процессов могут выступать протяженные концентраторы избыточных напряжений при затруднении в перемещении океанического и континентального блоков земной коры [Гольдин, 2005], активизация структурно-метаморфических преобразований на отдельных участках сейсмофокальной зоны [Ребецкий, 2007] и др.

Заключение

Выполненный анализ проявления предвестников перед сильными камчатскими землетрясениями по данным многолетних наблюдений с использованием пяти методов позволяет в первом приближении оценить информативность этих предвестников для прогноза событий с $M=6.6-7.8$, которые имеют социально значимый характер для населения и инфраструктуры Камчатки. В качестве показателя связи предвестников и землетрясений по отдельным методам использовалась величина параметра s , равная отношению числа землетрясений, перед которыми данный предвестник проявлялся, к общему числу землетрясений. Полученные значения $s=0.38-0.80$ характеризуют вероятность связи рассмотренных предвестников и сильных землетрясений. Для предвестников и землетрясений, произошедших южнее Кроноцкого полуострова, соответствующие величины возрастают ($s'=0.43-1.0$). Это определяется, в первую очередь, конфигурацией наблюдательной сети, размещенной на небольшой территории Петропавловского полигона.

Для двух из четырех использованных методов не выявлена связь между временем проявления предвестников T и магнитудой последующего землетрясения. Это говорит

о том, что факт выявления ряда предвестников и продолжительность их проявления не могут в настоящее время служить веским основанием для прогноза магнитуды последующего землетрясения в диапазоне магнитуд 6.6–7.8. Вместе с тем, при существующей наблюдательной сети предвестники проявляются по комплексу методов перед землетрясениями с $M \geq 7$ в районах южнее Кроноцкого полуострова. При прогнозировании таких землетрясений число предвестников N может быть полезным показателем. Для прогнозирования сильных землетрясений севернее Кроноцкого полуострова необходимо развитие наблюдательной сети.

Формирование рассмотренных предвестников, по-видимому, определяется детерминированным процессом изменения полей напряжений разного масштабного уровня. Предвестники в вариациях слабой сейсмичности и в горизонтальных деформациях континентальных районов определяются, в основном, региональным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Предвестники в режиме подземных вод и в вариациях ВСШ определяются, в основном, локальным масштабным уровнем изменения поля напряжений. Их формирование может быть связано с эпизодами развития приповерхностных зон трещинной дилатансии в горных породах. Источниками изменения регионального и локальных полей напряжений в пределах Камчатской зоны перехода континент-океан могут быть геодинамические и флюидо-метаморфические процессы в сейсмофокальной зоне. Предполагается, что такие процессы могут развиваться как на стадиях подготовки отдельных сильных землетрясений, так и в связи с включающими группы сильных землетрясений сейсмическими активизациями на Камчатке.

Опыт многолетних наблюдений показывает, что рассмотренные предвестники проявляются в комплексе, в основном, перед наиболее сильными сейсмическими событиями (например, Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г., $M_w=7.8$), а также перед наиболее близкими к территории Петропавловского полигона (например, Шипунские землетрясения 06.10.1987 г. и 02.03.1992 г.).

В связи со всем сказанным наиболее актуальными научными задачами при решении проблем прогноза землетрясений на Камчатке являются следующие:

- продолжение наблюдений за рассмотренными параметрами мониторинга для пополнения статистики по проявлениям предвестников именно перед сильными землетрясениям;
- развитие системы наблюдательных пунктов за предвестниками вдоль Восточного побережья Камчатки южнее и севернее Петропавловского полигона;
- создание *открытых* баз данных по различным параметрам мониторинга за многолетний период, позволяющих применять более широкий комплекс статистических оценок связи предвестников и землетрясений различного энергетического уровня, в частности критерий эффективности ретроспективного сейсмического прогноза [Гусев, 1974].

Литература

- Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е. О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. М.: ГЕОС, 2001. Вып. 32. С.81–97.
- Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 464 с.
- Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. № 10. С.37–54.
- Гольдин С.В. Макро- и мезоструктура очаговой области землетрясения // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 1. С.5–14.

- 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.
- Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др. Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда $MLH = 7.1$) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С.48–61.
- 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.
- Копылова Г.Н. Пространственно-временные вариации геодинамического режима Камчатки по данным инструментальных наблюдений // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, Ч. 2. С.288–291.
- Копылова Г.Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной науч.-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008а. С.24–28.
- Копылова Г.Н. О связи режима подземных вод с сейсмичностью и деформациями земной коры на стадиях подготовки сильных землетрясений // Разведка и охрана недр. 2008б. № 7. С.37–45.
- Копылова Г.Н., Сугробов В.М., Хаткевич Ю.М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С.53–70.
- Кравченко Н.М. Оценка эффективности прогностического параметра RTL // Вестн. КРАУНЦ. Сер. науки о Земле. 2005. № 2. Вып. № 6. С. 99–107.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А. Сравнение отклика сейсмических шумов на приливы по данным станций “Шикотан”, “Начики”, “Карымшина” // Геофизический мониторинг Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С.114–121.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С.54–67.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных массивов. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. 406 с.
- Салтыков В.А. Предвестниковые вариации высокочастотного сейсмического шума перед сильными землетрясениями Камчатки 1992–2004 гг. // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. С.116–120.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Синицын В.И., Чебров В.Н. Предвестники сильных землетрясений на Камчатке по данным мониторинга сейсмических шумов // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С.110–124.
- Соболев Г.А. Стадии подготовки сильных камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С.63–72.
- Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С.96–112.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С.91–107.

Сведения об авторах

КОПЫЛОВА Галина Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9, КФ ГС РАН. Тел./факс: 8(4152)431849. E-mail: gala@emsd.ru

СЕРАФИМОВА Юлия Константиновна – старший научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел./факс: 8(4152)431-850. E-mail: yulka@emsd.ru

ON SOME MEDIUM-TERM PRECURSORS OF STRONG ($M_w \geq 6.6$) EARTHQUAKES OF KAMCHATKA 1987–2004

G.N. Kopylova, Yu.K. Serafimova

*Kamchatka Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract. The results of the researching of five kinds of seismological, geodesic and hydro-geological precursors before thirteen strong earthquakes of Kamchatka ($M=6.6-7.8$) are presented. The systematization of these precursors was realized taking into consideration their composition and duration before separate events. The values of conjunction of precursors and earthquakes ($s=0.38-0.80$) were estimated. For precursors before most strong and nearest earthquakes the values of conjunction are increasing ($s'=0.43-1.0$). It is revealed, that the duration of some precursors does not depend from magnitude and parameter $M/\lg R$ (where R is the hypocentral distance to Petropavlovsk-Kamchatsky, km) of earthquakes. The probable mechanisms of examined precursors generation are discussed on a base of up-to-date conceptions concerning of earthquakes preparation processes. The self-descriptiveness of the examined precursors is estimated for the forecast of strong kamchatkan earthquakes.

Keywords: earthquakes, precursors, magnitude, Spearman rank correlation coefficient, field of stress, earthquakes preparation processes, model, dilatancy.